

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL -
PPGEC**

**INFLUÊNCIA DO EMPREGO DE POLÍMEROS
SUPERABSORVENTES NAS PROPRIEDADES DE MATERIAIS
À BASE DE CIMENTO PORTLAND**

Talita Campos Kumm

Florianópolis, agosto de 2009.

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA - UFSC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL -
PPGEC**

**INFLUÊNCIA DO EMPREGO DE POLÍMEROS
SUPERABSORVENTES NAS PROPRIEDADES DE MATERIAIS
À BASE DE CIMENTO PORTLAND**

Dissertação submetida à
Universidade Federal de Santa
Catarina como requisito parcial
exigido pelo Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Civil -
PPGEC, para a obtenção do
Título de MESTRE em
Engenharia Civil.

Talita Campos Kumm

Florianópolis, agosto de 2009.

**"INFLUÊNCIA DO EMPREGO DE POLÍMEROS
SUPERABSORVENTES NAS PROPRIEDADES DE MATERIAIS
À BASE DE CIMENTO PORTLAND"**

TALITA CAMPOS KUMM

Dissertação julgada adequada
para a obtenção do Título de
MESTRE em Construção Civil e
aprovada em sua forma final pelo
Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil - PPGECC da
Universidade Federal de Santa
Catarina - UFSC.

Prof. Dr. Glicério Trichês
Coordenador do PPGECC

Prof. Dr. Wellington Longuini
Repetto
Orientador/Moderador

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Claudio de Sousa
Kasmierczak
ECV/UNISINOS

Prof. Dr. Philippe Gleize
ECV/UFSC

Prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio
Jr. ECV/UFSC

Aos meus Pais.

“Ainda que eu tenha o dom da profecia e conheça todos os mistérios e toda a ciência, ainda que eu possua a plenitude da fé, a ponto de transportar montanhas, se não tiver caridade, nada sou.”

(São Paulo de Tarso)

"Mais vale compreender pouco do que compreender mal."

(Anatole France)

“O único lugar aonde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário.”

"Há uma força motriz mais poderosa que o vapor, a eletricidade e a energia atômica: a vontade."

(Albert Einstein)

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, minha gratidão a Deus, pelo intelecto, aptidão física e força a mim concedidos, sem os quais este trabalho jamais teria sido iniciado e tampouco concluído. Agradeço pelos obstáculos postos em meu caminho ao longo destes anos de vida acadêmica, por terem sido transpostos e por ter aprendido com eles. Quanto mais estudo, mais admiro Sua grandiosidade e perfeição inatingíveis, e vejo quão pretensioso é o homem ao querer desvendar todos os mistérios da natureza. Obrigada pela Sua onipresença em todos os momentos.

A concretização deste trabalho é certamente devida ao apoio de diversas pessoas e instituições, mas algumas delas merecem agradecimentos mais do que especiais. Minha profunda gratidão ao Prof. Dr. Wellington Longuini Repette, que depositou em mim sua confiança e expectativas quando, ainda durante minha graduação, convidou-me a ser sua orientanda de Mestrado. Muito obrigada Wellington pelo apoio, tempo, conselhos e ensinamentos a mim dedicados, tanto no âmbito acadêmico como pessoal. Obrigada pela paciência diante de tantas idas e vindas minhas à Florianópolis, tenham elas sido por motivos de estudos ou pessoais. Obrigada por não ter se oposto em momento algum às minhas experiências fora da UFSC, mesmo que elas tenham comprometido nosso calendário de pesquisa. Agradeço também ao Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine pelas oportunidades e acolhida na TU Kaiserslautern, por ter providenciado o suporte financeiro de meus trabalhos na Alemanha em 2005 e de meu retorno à mesma instituição de ensino em 2006. Agradeço pelo convite e fomento de minha participação no “RILEM Doctoral Course 2006 - Concrete Curing: from the research lab to the construction site”. Neste curso tive a oportunidade de ser aluna de vários autores referenciados neste trabalho, como Mr. Dale P. Bentz (NIST-USA), Prof. Ole Mejlhede Jensen (DTU-Denmark), Prof. Konstantin Kovler (Technion - Israel), Prof. Jason Weiss (Purdue University - USA) e Pietro Lura (DTU-Denmark), fato que deveras contribuiu para o embasamento teórico deste trabalho.

Agradeço ao CNPq, que ao longo de dois anos fomentou mensalmente meus estudos. Agradecimento também à Universidade Federal de Santa Catarina, instituição pública, gratuita e de qualidade, e atualmente um dos (contáveis) bons frutos dos impostos pagos pela sociedade em nosso Estado.

Ao PPGEC, na pessoa do seu coordenador Prof. Dr. Glicério Trichês e da secretária Marinéia.

Agradeço ao GTec, na pessoa de seu coordenador o Prof. Dr. Luiz Roberto Prudêncio Jr., pelo espaço cedido para realização desta pesquisa e pelos equipamentos disponibilizados para o trabalho experimental. Muito obrigada Prudêncio pelos ensinamentos, comentários e idéias. Agradecimento especial aos bolsistas de iniciação científica pelo valioso auxílio no laboratório: Wilson, Eddy, Washington, Zanette, Tochetto e Diego. A vocês meus votos de um brilhante futuro profissional. A todos os outros membros do grupo que, direta ou indiretamente também contribuíram: Regina, Casalli, Leco, e os colegas de mestrado Ju, Denis, Aline, Daniel, Zaira e Gabi.

Ao Laboratório de Materiais e Construção Civil (LMCC) da UFSC, onde foi executado o programa experimental, nas pessoas de Luiz Henrique, Roque e Renato.

Ao GDA e seu contribuidor, o Prof. Dr. Philippe Jean Paul Gleize, que cooperou prontamente desde a qualificação deste Mestrado e por disponibilizar espaço e equipamentos para realização do programa experimental. Agradecimentos também aos membros do GDA que muitas vezes auxiliaram e contribuíram com idéias: Eduardo e Franciel.

Ao Prof. Dr. Luis Alberto Gómez, que tanto contribuiu na montagem dos equipamentos e automatização dos ensaios. Muito obrigada Professor Luiz Gómez, pelas horas dedicadas a este projeto.

Às empresas que doaram os materiais utilizados nesta pesquisa. À Votoran, pelo cimento doado através do CD Biguaçu. À BASF que forneceu o polímero superabsorvente utilizado nesta pesquisa, em especial aos seus colaboradores Fernando Matias que viabilizou a importação do produto e a Gregor Herth, Químico Pesquisador-Sênior que contribuiu na medida do possível com dados sobre o produto.

À Flavinha, querida amiga, com quem dividi apartamento durante boa parte dos estudos. Muito obrigada pela amizade e companhia. À Dona Verônica e Seu Ventura, que me acolheram por alguns meses em sua residência, na ocasião de meu retorno à Florianópolis em 2008.

Ao Grupo Imaculada Conceição e aos amigos do Emaús Florianópolis, que fizeram a estadia em Florianópolis mais doce e produtiva. Obrigada por todo o carinho, amizade e por me ajudarem a crescer no “rumo certo e de peito aberto”.

Ao tio Julinho, pela ajuda com a montagem e reparo de equipamentos. Obrigada pela dedicação de seu precioso tempo a este projeto, mostrando-se sempre pronto no que estivesse ao seu alcance.

Ao meu noivo Klaus, por todo o amor, compreensão, carinho e paciência. Vielen Dank, mein Schatz. Du bist das beste was mir je

passiert ist, und unter allen Resultaten dieses Meisterskurses das am
besondersten! Danke für die Hilfe im Labor, deine Geduld und für die
ganze Unterstützung.

Ao final, mas não por menores méritos, agradeço aos meus pais
Jane e Roberto pelo amor e suporte incondicionais, por acreditarem em
mim e por se sacrificarem em prol dos investimentos em minha
educação. Muito obrigada por todos os finais de semana sacrificados
(foram tantos!) comigo nos laboratórios. Fizesse chuva ou sol, fosse dia
ou noite, vocês estiveram ao meu lado em todos os serões preparando
formas, pesando e re-pesando materiais, limpando e desmoldando, ou
simplesmente me aguardando para voltarmos juntos à Itajaí. Obrigada
por terem sido os maiores incentivadores de todos os planos e sonhos
concretizados em minha vida. Este trabalho também é fruto das suas
mãos. A vocês, pai e mãe, toda a minha gratidão.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	XI
LISTA DE FIGURAS.....	XVII
LISTA DE QUADROS.....	XXIII
LISTA DE TABELAS.....	XXV
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XXVII
RESUMO.....	XXIX
ABSTRACT.....	XXXI
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 IMPORTÂNCIA.....	1
1.2 JUSTIFICATIVA.....	2
1.3 OBJETIVOS.....	3
1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	4
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 RETRAÇÕES - CONCEITOS E DEFINIÇÕES.....	5
2.1.1 <i>Retração plástica</i>	6
2.1.2 <i>Retração autógena</i>	7
2.1.3 <i>Retração por secagem</i>	10
2.1.4 <i>Retração térmica</i>	11
2.1.5 <i>Retração por carbonatação</i>	12
2.2 MATERIAIS E INFLUÊNCIA NOS DIFERENTES TIPOS DE RETRAÇÃO.....	12
2.2.1 <i>Cimento e adições</i>	12
2.2.2 <i>Aditivos super plastificantes</i>	14
2.2.3 <i>Agregados</i>	15
2.2.4 <i>Água de amassamento</i>	15
2.3 MODELO DE POWERS E MOVIMENTAÇÃO DA ÁGUA NA PASTA DE CIMENTO PORTLAND.....	16
2.3.1 <i>Auto-secagem</i>	20
2.3.2 <i>Tensão superficial</i>	21
2.3.3 <i>Pressão de separação</i>	22
2.3.4 <i>Tensão Capilar</i>	23
2.4 ENSAIOS PARA MEDIDA DA RETRAÇÃO.....	26
2.5 FORMAS DE COMBATE À RETRAÇÃO AUTÓGENA E POR SECAGEM.....	30
2.6 CURA.....	31
2.6.1 <i>Polímeros superabsorventes</i>	34

2.7	APLICAÇÃO DO MODELO DE POWERS A AMOSTRAS SUBMETIDAS À CURA INTERNA POR INCORPORAÇÃO DE ÁGUA	37
2.8	SÍNTESE DA REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	40
3	PROGRAMA EXPERIMENTAL	43
3.1	MATERIAIS, DETERMINAÇÃO DOS TRAÇOS E PROCEDIMENTOS DE MISTURA	46
3.1.1	<i>Materiais</i>	46
3.1.2	<i>Determinação dos traços e procedimentos de mistura.....</i>	48
3.2	METODOLOGIA DE ENSAIOS.....	54
3.2.1	<i>Fluidez, exsudação e segregação das pastas de cimento ..</i>	54
3.2.2	<i>Massa específica das pastas de cimento</i>	55
3.2.3	<i>Evolução da temperatura.....</i>	55
3.2.4	<i>Retração autógena medida com transdutores de deslocamento</i>	56
3.2.5	<i>Retração autógena medida com relógio comparador.....</i>	59
3.2.6	<i>Acompanhamento da variação da temperatura e UR no interior das pastas em ambiente termostatizado.....</i>	63
3.2.7	<i>Resistência à Compressão.....</i>	65
3.2.8	<i>Módulo de Elasticidade.....</i>	66
4	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	69
4.1.1	<i>Fluidez, exsudação e segregação das pastas de cimento ..</i>	69
4.1.2	<i>Massa específica das pastas de cimento</i>	72
4.1.3	<i>Evolução da temperatura.....</i>	73
4.1.4	<i>Retração autógena medida com transdutores de deslocamento</i>	75
4.1.5	<i>Retração autógena medida com relógio comparador.....</i>	77
4.1.6	<i>Acompanhamento da variação da temperatura e UR no interior das pastas em ambiente termostatizado.....</i>	90
4.1.7	<i>Resistência à Compressão.....</i>	93
4.1.8	<i>Módulo de Elasticidade.....</i>	100
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	102
5.1	ESCOLHA DO TEOR DE PSA E DO MODO DE MISTURA.....	105
5.2	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	107
	ANEXO A	110
	ANEXO B.....	112
	ANEXO C	120
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	122

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – <i>CURING METER</i> . O DISPOSITIVO, DESENVOLVIDO POR JENSEN E HANSEN, POSSIBILITA A MEDIDA INSTANTÂNEA DA TAXA DE EVAPORAÇÃO, E DEVE SER POSICIONADO SOBRE A SUPERFÍCIE DA AMOSTRA.....	7
FIGURA 2 – TERMINOLOGIA RELACIONADA AOS FENÔMENOS AUTÓGENOS E NÃO-AUTÓGENOS (ADAPTADO, JENSEN E HANSEN 1996).....	8
FIGURA 3 – MEDIDAS DE RETRAÇÃO AUTÓGENA EM AMOSTRAS DE ARGAMASSA, COM DIFERENTES RELAÇÕES A/C E QUANTIDADES EQUIVALENTES DE ÁGUA (ADAPTADO: HOLT, 2002).	9
FIGURA 4 – DISTRIBUIÇÃO VOLUMÉTRICA DE FASES DA PASTA DE CIMENTO EM FUNÇÃO DO GRAU DE HIDRATAÇÃO (A), EM SISTEMA FECHADO (LIVRE DE TROCA DE UMIDADE COM O AMBIENTE). A): PARA UMA RELAÇÃO A/C DE 0,60: DADA A ALTA RELAÇÃO A/C ($>0,42$), A COMPLETA HIDRATAÇÃO DO CIMENTO ($A=1$) PODE SER TEORICAMENTE OBTIDA. B): PARA UMA RELAÇÃO A/C DE 0,30: DADA A BAIXA RELAÇÃO A/C ($<0,42$), A COMPLETA HIDRATAÇÃO DO CIMENTO ($A=1$) NÃO É POSSÍVEL, ESTANDO LIMITADA A UM GRAU MÁXIMO DE HIDRATAÇÃO (AMÁX) (ADAPTADO: JENSEN E HANSEN, 2001B).....	19
FIGURA 5 – SESSÃO TRANSVERSAL DE UMA PASTA DE CIMENTO EM PROCESSO DE HIDRATAÇÃO. À ESQUERDA, BAIXO GRAU DE HIDRATAÇÃO. À DIREITA, ALTO GRAU DE HIDRATAÇÃO. A MATÉRIA SÓLIDA (PRODUTOS DA HIDRATAÇÃO, CIMENTO ANIDRO, SÍLICA ATIVA, ETC.) É REPRESENTADA NA COR CINZA-ESCURO, A ÁGUA DOS POROS EM CINZA CLARO E OS POROS VAZIOS EM BRANCO. A LINHA PONTILHADA REPRESENTA A CIRCUNFERÊNCIA ORIGINAL DA SEÇÃO (JENSEN, 2000A).....	21
FIGURA 6 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA PRESSÃO DE SEPARAÇÃO (ADAPTADO: CHARRON, 2002).	22
FIGURA 7 – REPRESENTAÇÃO DE UMA CALOTA ESFÉRICA EM REPOUSO, SUBMETIDA A DOIS TIPOS DE FORÇA SOBRE ELA, COM MESMA DIREÇÃO E SENTIDOS OPOSTOS: TENSÃO (P_w), APLICADA EM SUA PAREDE, E UMA FORÇA QUE RESULTA DA PRESSÃO APLICADA NA MASSA DE AR CONTIDA NA CALOTA (P_a).	23
FIGURA 8 – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO EFEITO DA PERDA DE ÁGUA CAPILAR. EM A): O ESPAÇO ENTRE AS DUAS SUPERFÍCIES ESFÉRICAS, NÃO ESTÁ TOTALMENTE PREENCHIDO COM ÁGUA (LINHA PONTILHADA), MAS SIM PARCIALMENTE PREENCHIDO, E SUBMETIDO A TENSÕES CAPILARES. EM B): A PERDA DE ÁGUA FAZ COM QUE AUMENTE O RAIOS DE CURVATURA DO MENISCO, GERANDO UMA CONTRAÇÃO POR VARIAÇÃO DA TENSÃO CAPILAR (ESPING, 2007).	24

FIGURA 9 – MODELO DE APARATO PARA MEDIÇÃO LINEAR DA RETRAÇÃO. NAS EXTREMIDADES DO PRISMA E SOBRE O MOLDE (PRESO POR UM BRAÇO METÁLICO) ESTÃO ALOCADOS SENSORES DE DESLOCAMENTO A LASER, LIGADOS A UM AQUISITOR DE DADOS (AO FUNDO À DIREITA) (ADAPTADO: TOUCRY ET LOUKILI, 2004).	27
FIGURA 10 – MEMBRANAS DE POLIURETANO COM (À ESQUERDA) E SEM (À DIREITA) RESERVATÓRIO, PREENCHIDAS COM PASTA DE CIMENTO (LURA ET JENSEN, 2005).	28
FIGURA 11 – DILATÔMETRO. APARATO UTILIZADO NA MEDIDA LINEAR DA RETRAÇÃO AUTÓGENA, EM TUBOS CORRUGADOS, PREENCHIDOS COM MATERIAL CIMENTÍCIO (LURA ET AL., 2006).	29
FIGURA 12 – CLASSIFICAÇÃO DOS MÉTODOS DE CURA DO CONCRETO (ADAPTADO, RILEM, 2004A)	32
FIGURA 13 – AMOSTRAS DE POLÍMEROS SUPERABSORVENTES (PSAs) SECOS (ACIMA) E SATURADOS (ABAIXO) (TRAMFLOC, 2007).	34
FIGURA 14 – COMPARAÇÃO ENTRE UM GRÃO DE PSA COM LIGAÇÕES CRUZADAS SECO (À ESQUERDA) E SATURADO (À DIREITA) (NARSavage-HEALD)	36
FIGURA 15 – DISTRIBUIÇÃO VOLUMÉTRICA DE FASES DA PASTA DE CIMENTO EM FUNÇÃO DO GRAU DE HIDRATAÇÃO (A), EM SISTEMA FECHADO (LIVRE DE TROCA DE UMIDADE COM O AMBIENTE), PARA UMA RELAÇÃO A/C DE 0,30+0,05. ESTE DIAGRAMA É APLICÁVEL PARA A HIDRATAÇÃO COM UM SUPRIMENTO EXTERNO (EX.: CURA EXTERNA EM SISTEMA ABERTO) OU INTERNO (EX.:CURA INTERNA COM ÁGUA INCORPORADA). DADA A BAIXA RELAÇÃO A/C, A COMPLETA HIDRATAÇÃO DO CIMENTO (A=1) NÃO É POSSÍVEL (ADAPTADO: JENSEN E HANSEN, 2001B).	39
FIGURA 16 – COM BASE NAS (EQ. 17) E (EQ. 18), O GRÁFICO EXPRESSA O MÍNIMO NECESSÁRIO DE ÁGUA INCORPORADA, PARA OBTER α_{\max} E, ASSIM, PREVENIR A AUTO-SECAGEM (ADAPTADO: JENSEN E HANSEN, 2001B).	40
FIGURA 17 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO PSA UTILIZADO NESTE TRABALHO.	47
FIGURA 18 - PREPARO DE MISTURA COM PSA ADICIONADO NO MODO SECO (MISTURAS DENOMINADAS SEC). EM A) A ADIÇÃO DO PSA AO CIMENTO, SEM QUALQUER ADIÇÃO DE ÁGUA. EM B) A HOMOGENEIZAÇÃO DOS MATERIAIS AINDA SECOS NO RECIPIENTE PLÁSTICO COM AJUDA DE ESPÁTULA. EM C) O MATERIAL SECO SENDO ADICIONADO A TODA A ÁGUA (ÁGUA DE AMASSAMENTO E ÁGUA DESTINADA À CURA INTERNA).	50
FIGURA 19 – DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO DE MISTURA COM POLÍMERO ADICIONADO SECO (MISTURAS DENOMINADAS SEC). OS EVENTOS	

ESTÃO RELACIONADOS ÀS CORES QUE COMPÕEM A LINHA DO TEMPO ESQUEMATIZADA.	50
FIGURA 20 - PREPARO DE MISTURA COM PSA ADICIONADO NO MODO ÚMIDO. EM A) A ÁGUA DESTINADA À CURA INTERNA É MISTURADA AO PSA E RESERVADO B) O CIMENTO E A ÁGUA DE AMASSAMENTO SÃO MISTURADOS E HOMOGENEIZADOS. EM C) A MISTURA RESERVADA DE PSA E DE ÁGUA DESTINADA À CURA INTERNA É ADICIONADA À PASTA DE CIMENTO E NOVAMENTE HOMOGENEIZADA.	51
FIGURA 21 – DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO DE MISTURA COM POLÍMERO ADICIONADO ÚMIDO (MISTURAS DENOMINADAS UM). OS EVENTOS ESTÃO RELACIONADOS ÀS CORES QUE COMPÕEM A LINHA DO TEMPO ESQUEMATIZADA.	52
FIGURA 22 – DESCRIÇÃO DO PROCEDIMENTO DE MISTURA COM POLÍMERO ADICIONADO SATURADO (MISTURAS DENOMINADAS SAT). OS EVENTOS ESTÃO RELACIONADOS ÀS CORES QUE COMPÕEM A LINHA DO TEMPO ESQUEMATIZADA.	53
FIGURA 23 - PREPARO DE MISTURA COM PSA ADICIONADO NO MODO SATURADO. EM A) A MISTURA DO PSA COM TODA A ÁGUA (DE AMASSAMENTO E DESTINADA À CURA INTERNA). EM B) HOMOGENEIZAÇÃO DA ÁGUA COM PSA PARA DESFAZER OS GRUMOS DE POLÍMERO QUE EVENTUALMENTE SE FORMEM. EM C) A ADIÇÃO DO CIMENTO.....	53
FIGURA 24 - REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA. EM A) PREENCHIMENTO DO RECIPIENTE. EM B) PASTA SENDO ADENSADA COM GOLPES DE SOQUETE.	55
FIGURA 25 - BANCADA DE RETRAÇÃO COMPOSTA DE MOLDES METÁLICOS E TRANSDUTORES DE DESLOCAMENTO. EM A) VISTA DA BANCADA COM AMOSTRA EM ENSAIO. EM B) DETALHE DA PORCA JÁ AFROUXADA , DEPOIS DE ALCANÇADO O T_0	57
FIGURA 26 – ESQUEMA DA BANCADA DE RETRAÇÃO. EM A) A REPRESENTAÇÃO DO CORPO-DE-PROVA DESDE A MOLDAGEM ATÉ QUE SEJA ALCANÇADO O T_0 . EM B) A REPRESENTAÇÃO DO MESMO CORPO-DE-PROVA APÓS O ALCANCE DO T_0 . NOTE-SE A REMOÇÃO DA BARREIRA DE CONTENÇÃO E O AFROUXAMENTO DAS PORCAS PARA LIBERAÇÃO DO PINO EM CONTATO COM O TRANSDUTOR DE DESLOCAMENTO.	58
FIGURA 27 - MODELO DE MOLDE UTILIZADO PARA PREPARO DOS CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS AOS ENSAIOS DE RETRAÇÃO COM RELÓGIO COMPARADOR. OS CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS SÃO BASEADOS NO DESCRITO PELA ASTM C 490 - 04 (2004). PARA O ENSAIO DE RETRAÇÃO COM TRANSDUTOR DE DESLOCAMENTO O MESMO MOLDE FOI UTILIZADO, NO ENTANTO COM OUTROS MODELOS DE PINOS	60
FIGURA 28 - MEDIDAS DE RETRAÇÃO COM CORPOS DE PROVA PRISMÁTICOS COM BASE NO PROCEDIMENTO PROPOSTO PELA ASTM C 490 -04	

(2004). EM A) CALIBRAÇÃO DO RELÓGIO COMPARADOR COM BASE NA BARRA DE REFERÊNCIA. EM B) QUADRO DE MEDIÇÃO COM CORPO-DE-PROVA POSICIONADO PARA LEITURA. EM DESTAQUE A FLECHA INDICATIVA DA ROTAÇÃO DO CORPO SOBRE O PRÓPRIO EIXO E A SETA INDICANDO A EXTREMIDADE DO PRISMA QUE DEVE SER SEMPRE ORIENTADA PARA CIMA DURANTE AS MEDIÇÕES. EM C) CORPOS DE PROVA EM REPOUSO SOBRE ROLETES, NA POSIÇÃO EM QUE PERMANECERAM ENTRE AS MEDIÇÕES.	61
FIGURA 29 – ESQUEMA DO TUBO DE ENSAIO COM AMOSTRA SUBMETIDA AO MONITORAMENTO DE UR E TEMPERATURA EM BANHO TERMOSTATIZADO. ATRAVÉS DE UM FURO PASSANTE NA ROLHA DE VEDAÇÃO DO TUBO, É POSSÍVEL INSERIR O SENSOR DE UMIDADE E TEMPERATURA DE MANEIRA QUE O SISTEMA FIQUE ISOLADO DO CONTATO COM A ATMOSFERA.	64
FIGURA 30 – PREPARAÇÃO DE AMOSTRAS SUBMETIDAS A MONITORAMENTO DE TEMPERATURA E UR. EM A) ENCAIXE DOS TUBOS DE ENSAIO NO SUPORTE DE ISOPOR. EM B) MONITORAMENTO COM OS TUBOS DE ENSAIO JÁ IMERSOS NO BANHO TERMOSTATIZADO. DETALHE DOS SENSORES LIGADOS AO AQUISITOR DE DADOS.	64
FIGURA 31 – APARATO UTILIZADO PARA REALIZAÇÃO DE ENSAIO DE MÓDULO DE ELASTICIDADE EM CORPO-DE-PROVA CILÍNDRICO, 5 x 10 CM, DE PASTA DE CIMENTO.	66
FIGURA 32 - DIÂMETRO MÉDIO DE ESPALHAMENTO DAS PASTAS DE CIMENTO ANTES DA APLICAÇÕES DE GOLPES NA MESA (FLOW 0), APÓS APLICAÇÃO DE 10 GOLPES (FLOW 10) E APÓS APLICAÇÃO DE MAIS 10 GOLPES (FLOW 20).....	69
FIGURA 33 - EFEITO DO TEOR DE POLÍMERO E MODO DE ADIÇÃO NA FLUIDEZ. TODAS AS MISTURAS TÊM MESMA RELAÇÃO A/C TOTAL.	71
FIGURA 34 - MASSA ESPECÍFICA DAS PASTAS DE CIMENTO.	73
FIGURA 35 - EVOLUÇÃO DE TEMPERATURA DA MISTURA R35. O PICO MÁXIMO DE TEMPERATURA DA AMOSTRA INDICA O MOMENTO CONSIDERADO COMO T_0 DA MISTURA.	73
FIGURA 36 - TEMPO ZERO E PICO MÁXIMO DE TEMPERATURA ALCANÇADA POR CADA MISTURA. AMOSTRAS MANTIDAS EM CALORÍMETRO SEMI-ADIABÁTICO.....	74
FIGURA 37 – EVOLUÇÃO DA RETRAÇÃO AUTÓGENA DAS PASTAS DE CIMENTO. MEDIDAS TOMADAS POR TRANSDUTORES DE DESLOCAMENTO.	75
FIGURA 38 – CURVAS DE EVOLUÇÃO DE TEMPERATURA DAS PASTAS DE CIMENTO. MEDIDAS TOMADAS A CADA 20 MINUTOS ATRAVÉS DE TERMOPARES DO TIPO K.	76
FIGURA 39 - RETRAÇÃO AUTÓGENA DA MISTURA R30.....	78
FIGURA 40 - RETRAÇÃO AUTÓGENA DA MISTURA R35.....	79
FIGURA 41 - RETRAÇÃO AUTÓGENA DA MISTURA R42.....	79

FIGURA 42 - RETRAÇÃO AUTÓGENA DA MISTURA 0,14-SEC.....	80
FIGURA 43 - RETRAÇÃO AUTÓGENA DA MISTURA 0,14-UM.	80
FIGURA 44 - RETRAÇÃO AUTÓGENA DA MISTURA 0,14-SAT.	81
FIGURA 45 - RETRAÇÃO AUTÓGENA DA MISTURA 0,20-SEC.....	81
FIGURA 46 - RETRAÇÃO AUTÓGENA DA MISTURA 0,20-UM.	82
FIGURA 47 - RETRAÇÃO AUTÓGENA DA MISTURA 0,20-SAT.	82
FIGURA 48 - RETRAÇÃO AUTÓGENA DA MISTURA 0,27-SEC.....	83
FIGURA 49 - RETRAÇÃO AUTÓGENA DA MISTURA 0,27-UM.	83
FIGURA 50 - RETRAÇÃO AUTÓGENA DA MISTURA 0,27-SAT.	84
FIGURA 51 - RETRAÇÃO AUTÓGENA MÉDIA, ESTIMADA PELA ANÁLISE ESTATÍSTICA, EM FUNÇÃO DA IDADE. MEDIDAS TOMADAS COM RELÓGIO COMPARADOR. VALORES POSITIVOS INDICAM EXPANSÃO.	86
FIGURA 52 - EFEITO DO TEOR DE POLÍMERO E MODO DE ADIÇÃO NA RETRAÇÃO MÉDIA ESTIMADA. TODAS AS MISTURAS TÊM MESMA RELAÇÃO A/C TOTAL. MEDIDAS TOMADAS COM RELÓGIO COMPARADOR. VALORES POSITIVOS INDICAM EXPANSÃO.	87
FIGURA 53 - REPRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DE RETRAÇÃO AUTÓGENA OBTIDOS PELO ENSAIO COM RELÓGIO COMPARADOR E PELO ENSAIO COM TRANSDUTORES DE DESLOCAMENTO.	89
FIGURA 54 – CURVAS DE EVOLUÇÃO DE UR INTERNA DAS PASTAS DE CIMENTO EM AMBIENTE TERMOSTATIZADO. MÉDIAS DOS RESULTADOS OBTIDOS DE DOIS CORPOS DE PROVA DE CADA MISTURA. MEDIDAS TOMADAS A CADA 20 MINUTOS.	90
FIGURA 55 - PRESSÕES CAPILARES ESTIMADAS (PELA (EQ. 11)) AOS 3 DIAS. A RESISTÊNCIA À TRAÇÃO ESTIMADA DE CADA MISTURA CORRESPONDE A 10% DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO.	92
FIGURA 56 – CURVAS DE EVOLUÇÃO DE TEMPERATURA DAS PASTAS DE CIMENTO EM AMBIENTE TERMOSTATIZADO. MEDIDAS TOMADAS A CADA 20 MINUTOS ATRAVÉS DE SENSORES DE UMIDADE E TEMPERATURA.....	93
FIGURA 57 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO MÉDIA AOS 3 DIAS.....	95
FIGURA 58 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO MÉDIA AOS 7 DIAS.....	96
FIGURA 59 – RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO MÉDIA AOS 28 DIAS.....	97
FIGURA 60 - AGRUPAMENTOS DAS RESISTÊNCIAS MÉDIAS À COMPRESSÃO POR TEOR DE PSA E MÉTODO DE ADIÇÃO.	99
FIGURA 61 - MÓDULO DE ELASTICIDADE MÉDIO E RESISTÊNCIA MÉDIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS.....	101
FIGURA 62 - DETALHES DO CALORÍMETRO SEMI-ADIABÁTICO DURANTE SUA CONFECCÃO. EM A) DIMENSÕES EXTERNAS. EM B) DIMENSÕES INTERNAS E REVESTIMENTO DAS FACES EXTERNAS COM FILME DE ALUMÍNIO. EM C) E D) DIMENSÕES DA TAMPA DO CALORÍMETRO.	110
FIGURA 63 - VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS TRATAMENTOS NA RETRAÇÃO MÉDIA AOS 3 DIAS. OS DADOS EM DESTAQUE REPRESENTAM	

VALORES ASSUMIDOS PARA CORPOS DE PROVA DESCARTADOS (MÉDIAS DOS OUTROS DOIS QUE COMPLEMENTAM O GRUPO).	116
FIGURA 64 - VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS TRATAMENTOS NA RETRAÇÃO MÉDIA AOS 7 DIAS. OS DADOS EM DESTAQUE REPRESENTAM VALORES ASSUMIDOS PARA CORPOS DE PROVA DESCARTADOS (MÉDIAS DOS OUTROS DOIS QUE COMPLEMENTAM O GRUPO).	117
FIGURA 65 - VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DOS TRATAMENTOS NA RETRAÇÃO MÉDIA AOS 28 DIAS. OS DADOS EM DESTAQUE REPRESENTAM VALORES ASSUMIDOS PARA CORPOS DE PROVA DESCARTADOS (MÉDIAS DOS OUTROS DOIS QUE COMPLEMENTAM O GRUPO).	118

LISTA DE QUADROS

QUADRO 1 - RESUMO DO PROGRAMA EXPERIMENTAL	45
QUADRO 2 - NOMECLATURA E COMPOSIÇÃO DAS MISTURAS ESTUDADAS....	54

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DO CIMENTO. DADOS FORNECIDOS PELO FABRICANTE. CIMENTO DO TIPO CPV-ARI-RS.....	46
TABELA 2 - CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DO CIMENTO. DADOS FORNECIDOS PELO FABRICANTE. CIMENTO DO TIPO CPV-ARI-RS.....	46
TABELA 3 - MASSA ESPECÍFICA, VARIAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA EM FUNÇÃO DA ADIÇÃO DO POLÍMERO E TEOR DE AR INCORPORADO DAS PASTAS DE CIMENTO TESTADAS.	72
TABELA 4 - TEMPO ZERO (T_0) A PARTIR DO QUAL A RETRAÇÃO AUTÓGENA FOI CONSIDERADA E PICO MÁXIMO DE TEMPERATURA ALCANÇADA POR CADA MISTURA NO CALORÍMETRO SEMI-ADIABÁTICO DESCRITO NO ANEXO A.....	74
TABELA 5 - VARIAÇÃO DE MASSA DOS CORPOS DE PROVA SUBMETIDOS AO ENSAIO DE RETRAÇÃO COM RELÓGIO COMPARADOR. VARIAÇÃO AOS 28 DIAS. VALORES NEGATIVOS INDICAM A PERDA DE MASSA.	77
TABELA 6 - RESULTADOS DE RETRAÇÃO AUTÓGENA MEDIDA COM RELÓGIO COMPARADOR. OS VALORES ADVÊM DA APLICAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE LINHAS DE TENDÊNCIA DE CADA PRISMA, PARA AS DADAS IDADES. VALORES EM DESTAQUE SÃO ESTIMATIVAS FEITAS A PARTIR DA MÉDIA DOS OUTROS DOIS CORPOS DE PROVA QUE COMPÕEM A MESMA FAMÍLIA. VALORES POSITIVOS INDICAM EXPANSÃO.	85
TABELA 7 - RESISTÊNCIA MÉDIA À COMPRESSÃO DAS PASTAS DE CIMENTO AOS 3, 7 E 28 DIAS.	94
TABELA 8 - RESULTADOS INDIVIDUAIS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS E RESPECTIVOS COEFICIENTES DE VARIAÇÃO.	97
TABELA 9 - RESULTADOS DOS ENSAIOS DE MÓDULO DE ELASTICIDADE, COM RESPECTIVAS MÉDIAS E COEFICIENTES DE VARIAÇÃO.	100
TABELA 10 - EFEITOS PROVOCADOS PELO SIMPLES AUMENTO DA RELAÇÃO A/C E PELA CURA INTERNA COM PSA, APLICADOS A UMA PASTA DE CIMENTO COM RELAÇÃO A/C 0,30.....	107
TABELA 11 - RETRAÇÃO MEDIDA COM RELÓGIO COMPARADOR AOS 3 DIAS, EM 3 CORPOS DE PROVA. OS DADOS EM DESTAQUE REPRESENTAM VALORES ASSUMIDOS PARA CORPOS DE PROVA DESCARTADOS (MÉDIAS DOS OUTROS DOIS QUE COMPLEMENTAM O GRUPO).	113
TABELA 12 - RETRAÇÃO MÉDIA MEDIDA COM RELÓGIO COMPARADOR AOS 3 DIAS E RESULTADO DA ANÁLISE ESTATÍSTICA ANOVA.	113
TABELA 13 - RETRAÇÃO MEDIDA COM RELÓGIO COMPARADOR AOS 7 DIAS, EM 3 CORPOS DE PROVA. OS DADOS EM DESTAQUE REPRESENTAM VALORES ASSUMIDOS PARA CORPOS DE PROVA DESCARTADOS (MÉDIAS DOS OUTROS DOIS QUE COMPLEMENTAM O GRUPO).	114
TABELA 14 - RETRAÇÃO MÉDIA MEDIDA COM RELÓGIO COMPARADOR AOS 7 DIAS E RESULTADO DA ANÁLISE ESTATÍSTICA ANOVA.	114

TABELA 15 - RETRAÇÃO MEDIDA COM RELÓGIO COMPARADOR AOS 28 DIAS, EM 3 CORPOS DE PROVA. OS DADOS EM DESTAQUE REPRESENTAM VALORES ASSUMIDOS PARA CORPOS DE PROVA DESCARTADOS (MÉDIAS DOS OUTROS DOIS QUE COMPLEMENTAM O GRUPO).	115
TABELA 16 - RETRAÇÃO MÉDIA MEDIDA COM RELÓGIO COMPARADOR AOS 28 DIAS E RESULTADO DA ANÁLISE ESTATÍSTICA ANOVA.	115
TABELA 17 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 3 DIAS E DIFERENÇA PERCENTUAL COM RELAÇÃO À MISTURA R35.	120
TABELA 18 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 7 DIAS E DIFERENÇA PERCENTUAL COM RELAÇÃO À MISTURA R35.	120
TABELA 19 - RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS E DIFERENÇA PERCENTUAL COM RELAÇÃO À MISTURA R35.	121

LISTA DE SÍMBOLOS

- α - grau de hidratação do cimento;
- α_{\max} - grau máximo de hidratação do cimento;
- a/c - relação água/cimento;
- $(a/c)_i$ - água incorporada;
- C_3A - aluminato tricálcico;
- C_4AF - ferro aluminato tetracálcico;
- $C-S-H$ - silicato de cálcio hidratado;
- CSA - sulfoaluminato de cálcio
- C_2S - silicato dicálcico;
- C_3S - silicato tricálcico;
- \emptyset - diâmetro;
- M_w - massa molar da água;
- p - porosidade inicial;
- P_a - pressão do ar;
- P_c - pressão capilar;
- $P_{c,máx}$ - pressão máxima capilar;
- P_w - pressão da água;
- pH - potencial hidrogeniônico
- PSA - polímero superabsorvente;
- ρ_w - densidade da água;
- R - constante universal do gás ideal;
- r - raio principal da superfície capilar;
- $r1$ e $r2$ - raios principais do capilar;
- RA - retração autógena;
- RH - Umidade relativa;
- θ - ângulo entre a face do tubo capilar em contato com o líquido e o menisco formado;
- σ_b - tensão maior de compressão;
- σ_a - tensão básica de compressão;
- σ_b - 40% da resistência à compressão do material;
- S - superfície específica do cimento, medida pelo método de Blaine;
- t_0 - tempo zero, a partir do qual considerou-se a retração autógena;
- T - temperatura absoluta;
- UR - umidade relativa;
- V_{AC} - volume de água capilar;

V_{AG} - volume de água de gel;

V_{CA} - volume de cimento anidro;

V_{GS} - volume de sólidos de gel;

V_{RQ} - volume de retração química;

$V_{ew,0}$ - volume inicial de água incorporada;

γ_w - tensão superficial da água.

RESUMO

A retração autógena é um problema que atinge materiais de baixa relação a/c e alto teor de finos, como os concretos de alto desempenho. Quando o material está restringido, a retração autógena pode gerar tensões que levem à fissuração e comprometimento estético, funcional, estrutural e da durabilidade da estrutura. Por este motivo, muito tem sido estudado em todo o mundo no que tange às causas, consequências e meios de combate da retração autógena.

O combate à retração autógena pelo uso da cura interna com água incorporada vem sendo estudado há algum tempo com a utilização de agregados leves, mas recentemente uma nova abordagem inseriu nova tecnologia nesta ciência: o uso de polímeros superabsorventes como agentes incorporadores da água destinada à cura interna. Informações essenciais sobre a influência da cura interna com polímeros superabsorventes nas propriedades do estado fresco e endurecido foram até então pouco divulgadas. Seriam as demais características de um material de baixa relação água/cimento sacrificadas pelo combate à retração? Até que ponto seria válido utilizar-se desta nova tecnologia para salvaguardar-se da retração autógena? Teor e método de adição do polímero influem nos resultados finais?

Através de resultados obtidos em ensaios de fluidez, massa específica, retração autógena, evolução da temperatura e UR interna, resistência à compressão e módulo de elasticidade de pastas de cimento, este estudo demonstra que, mesmo afetando o comportamento do material no estado fresco e endurecido, o uso dos polímeros superabsorventes pode ser benéfico. Estes benefícios, no entanto, não se restringem à redução da retração autógena. Aumento de resistência à compressão, de módulo de elasticidade, e mesmo diminuição da massa específica de pastas de cimento são apenas alguns dos efeitos a citar.

Ao final deste trabalho foram identificadas quatro misturas (diferindo entre si quanto ao teor e modo de adição do polímero) que combateram em pelo menos 80% a retração autógena aos 28 dias.

ABSTRACT

Autogenous shrinkage is a problem normally happening to materials with low w/c ratios and high fines contents, such as high performance concretes. When the material is restrained, the autogenous shrinkage can lead to tensile stresses which can cause creeping of the material, committing it structurally, aesthetically and functionally. Thus, a lot has been studied worldwide on what it concerns about the causes, consequences and techniques of mitigation of autogenous shrinkage.

The mitigation of the autogenous shrinkage by the use of internal curing has been studied since a certain time with low weight aggregates, but recently a new approach inserted a new technology in this science: the use of superabsorbent polymers as water entrainment agents. Essential information, on the effect of internal curing with super absorbent polymers over the fresh and hardening material's properties, have been barely published so far. Would the other qualities of a low water/cement material be scarified for the autogenous mitigation? How far would it be worth it the usage of this new technology to keep far the autogenous shrinkage? Would the polymer's amount and its addition method have influence on the final results?

By means of experimental results on flowability, specific mass, autogenous shrinkage, temperature and internal RH evolution, compressive strength and elasticity modulus of cement pastes, this study demonstrates that, even affecting the materials behavior in fresh and hardened state, the internal curing with superabsorbent polymers can be benefic.

At the end of this work four mixtures (differing from each other in polymer's amount and mixture method) were identified as mitigating the autogenous shrinkage in at least 80% at 28 days.

1 INTRODUÇÃO

1.1 *Importância*

Na atualidade é cada vez mais freqüente o uso de concretos de alto desempenho. Estes materiais destacam-se pela boa trabalhabilidade, alta resistência a compressão, baixa porosidade, dentre outras características. Para obter tais vantagens são utilizados aditivos superplastificantes, adições como sílica-ativa, altos consumos de cimento, baixas relações água/cimento e freqüentemente cimentos mais finos. A combinação destes materiais e suas proporções conferem aos concretos de alto desempenho uma estrutura de poros notavelmente refinados e descontínuos.

A retração autógena provém do desequilíbrio de tensões nos poros capilares de materiais compostos de cimento hidratado. Sabe-se que quanto menor a relação água/cimento menores os diâmetros dos poros da matriz cimentícia. Sabe-se ainda que, quanto menores os diâmetros dos capilares maiores as tensões a que estão suscetíveis quando decresce a umidade no seu interior. Sendo assim, as tensões de tração nestes materiais podem ser de tal ordem que superem a resistência da matriz cimentícia a estes esforços. Ocorrendo isto, simultaneamente com a condição de estar restringido, pode haver a ruptura do material e por conseqüência uma queda no seu desempenho (estrutural, estético e de durabilidade). Em suma, um concreto dosado para oferecer desempenho superior ao dos concretos ordinários pode ter suas vantagens sacrificadas pela retração autógena.

Em função deste problema e das cifras dele provenientes, muito se tem investigado nas últimas duas décadas a respeito da retração autógena. As pesquisas relacionadas ao tema possibilitaram um entendimento básico da dinâmica da retração, no que concerne aos fenômenos que a regem. Por meio de modelagem matemática, pode-se hoje prever e mensurar seu acontecimento com razoável confiabilidade para as misturas estudadas.

Vários são os artifícios utilizados na prevenção da retração autógena, a citar especialmente a cura externa e a cura interna nas diferentes formas existentes. Em 2001, Jensen e Hansen publicaram o primeiro artigo abordando a utilização de polímeros superabsorventes como agentes de cura interna, atuando principalmente no combate à retração autógena. Tal hipótese foi respaldada pelo que já vinha sendo observado na utilização de agregados leves para o mesmo fim: o fornecimento de água livre, disponível internamente no decorrer da

hidratação do cimento, contribui para um menor desequilíbrio de tensões capilares na rede de poros da micro-estrutura cimentícia, minimizando o fenômeno da retração autógena. Após diversas tentativas frustradas iniciadas em 1997 com diferentes polímeros superabsorventes disponíveis no mercado, Jensen e Hansen chamaram a atenção da comunidade científica com os resultados obtidos. Foi então criada, em 2002, uma rede de estudiosos do tema. Inicialmente a rede de estudos foi representada pelo comitê técnico 196 da União internacional dos laboratórios e especialistas em materiais de construção, sistemas e estruturas (RILEM¹), intitulado “ICC - Cura interna do concreto”². Posteriormente o comitê 196 deu origem a um segundo comitê técnico, intitulado “SAP - Aplicação de PSAs em construções de concreto”³. Hoje, este comitê conta com membros de mais de 12 países, os quais desenvolvem pesquisas no tema, visando estabelecer normas e manuais de práticas para uso destes materiais.

É impossível mensurar os valores gastos anualmente, no mundo inteiro, em reparos de fissuras originadas pela retração autógena. O que há muito se sabe é que vale a consagrada premissa, de que prevenir é melhor (e normalmente mais barato) do que remediar. Ainda que existam maneiras de mitigar o problema, muitas das formas de combate difundidas são caras e não eficientes em sua totalidade. Dentre as práticas recentemente desenvolvidas, a utilização de polímeros superabsorventes é vista como promissora para o combate de retração autógena. Igarashi e Watanabe (2006) chegam a relatar a eliminação de retração autógena a partir da adição de tais polímeros em corpos de prova de pasta de cimento e de concreto.

O que parece ser a solução para o problema é, concomitantemente, motivo de outros efeitos não desejáveis ao produto cimentício (como alterações no estado fresco e endurecido) que necessitam ser também investigados.

1.2 Justificativa

Resultados positivos como os apresentados por Igarashi *et al* (2006), Mechtcherine *et al* (2006), Lura *et al* (2006), Kumm (2006a),

¹ Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages.

² ICC - Internal Curing of Concrete.

³ Application of super absorbent polymers in concrete construction.

Kumm (2006b), dentre outros, levam a crer que o problema de retração autógena está prestes a ter um combate eficiente. Não obstante, faltam informações no que se refere à influência da adição de polímeros superabsorventes em outras propriedades dos materiais à base de cimento, quer no estado fresco, quer no estado endurecido.

Há uma infinidade de polímeros superabsorventes disponíveis no mercado mundial, originalmente desenvolvidos para outros fins (produtos de higiene, brinquedos, agricultura, etc.), o que suscita questionamentos quanto à sua utilização para a cura interna com eficaz combate à retração autógena. Qual a influência da utilização de cura interna com polímeros super absorventes na fluidez, exsudação e segregação? Qual a sua contribuição para a evolução da UR interna da pasta de cimento? Como esta prática afeta a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do material submetido à cura interna? Qual o teor ótimo de polímero necessário para realizar com eficiência o combate à retração autógena? Existe um método de adição do polímero que maximize seus efeito de agente de cura interna?

1.3 *Objetivos*

O objetivo geral deste trabalho é obter informações acerca dos efeitos do uso de um dado polímero superabsorvente como agente de combate à retração autógena de materiais à base de cimento. Através de ensaios em pasta de cimento pretende-se coletar dados suficientes para avaliar a eficiência do polímero no combate à retração autógena e seus efeitos em propriedades do estado fresco e endurecido. Neste contexto, espera-se identificar uma dosagem e método de adição do polímero que combatam com eficiência a retração autógena.

Dado o exposto, citam-se os objetivos específicos desta pesquisa:

- Verificar a eficiência do polímero estudado como agente de cura interna no combate à retração autógena;
- Identificar um teor de polímero que seja eficiente no combate à retração autógena até os 28 dias;
- Identificar um modo de adição do polímero que otimize o seu efeito de agente de cura interna para combate da retração autógena;
- Avaliar os efeitos da cura interna com polímero superabsorvente em outras propriedades da pasta de cimento fresca e endurecida, como fluidez, exsudação e segregação,

massa específica, evolução de temperatura e umidade relativa interna, resistência à compressão e módulo de elasticidade.

1.4 Estrutura da dissertação

Esta dissertação está dividida em cinco capítulos, descritos a seguir.

No capítulo 1 está fundamentada a importância deste trabalho, indicando quão grave e crescente é o problema da retração autógena em materiais de baixa relação a/c. Neste capítulo estão expostos a justificativa e os objetivos do trabalho.

No capítulo 2 consta o embasamento teórico que respalda toda a metodologia adotada neste trabalho. Ele é composto de uma ampla revisão bibliográfica sobre: tipos de retração (especialmente retração autógena), influência dos materiais nos diferentes tipos de retração, fenômenos que regem a retração autógena, modelo de Powers, tipos de ensaio para monitoramento da retração, formas de combate à retração autógena (em especial a cura interna com água incorporada).

O capítulo 3 detalha o programa experimental desenvolvido neste trabalho, a partir do qual foram coletados os resultados que nele constam. Informações quanto aos materiais utilizados, dosagens, modos de mistura e metodologias de ensaios são expostos aqui. Também neste capítulo estão descritos os parâmetros e critérios, bem como ferramentas computacionais, adotados para avaliação dos resultados.

O capítulo 4 contém os resultados coletados nos experimentos antes e após o tratamento estatístico dos mesmos. Neste capítulo estão expostos diversos gráficos que inter-relacionam as propriedades estudadas, facilitando a análise e discussão dos resultados.

O capítulo 5 contém as conclusões finais do trabalho, baseadas no que foi relatado ao longo dos capítulos anteriores. Nele estão expostas também sugestões para trabalhos futuros.

Ao final, os Anexos complementam este trabalho com informações sobre equipamentos utilizados e detalhes de análises estatísticas dos resultados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 *Retrações - conceitos e definições*

Independentemente do tipo de cimento Portland utilizado, das proporções de traço e do tipo de cura empregado, todas as peças de concreto estão submetidas a variações volumétricas (retração) ao longo do tempo, seja por fenômenos físicos ou químicos. Quando em peças restringidas, estas variações volumétricas podem originar fissuras, dada a intensidade das tensões criadas internamente.

Estritamente falando, retração é uma deformação tridimensional de contração do concreto pela perda de água, mas normalmente expressa como deformação linear. Esta referência é mais utilizada porque a maioria dos elementos de concreto possui uma ou duas dimensões muito inferiores à terceira, e os efeitos da retração são mais intensos na maior dimensão (AİTCIN et al., 1997).

Por tratar-se de uma variação volumétrica, a retração nos materiais cimentícios também está atrelada a dois conceitos de volume: o volume aparente e o volume absoluto. O volume aparente é aquele que pode ser visto sem quaisquer descontos de vazios internos, ou seja, é definido pela forma externa do elemento. O volume absoluto corresponde ao volume de matéria sólida que compõe o volume aparente. Quando o cimento é hidratado o seu volume absoluto diminui e quando a mistura é curada ao ar o seu volume aparente também diminui.

Comumente se conclui que a contração do volume absoluto é automaticamente acompanhada da contração do volume aparente, mas nem sempre isto ocorre. O volume absoluto do concreto convencional curado em água diminui certamente, todavia o seu volume aparente aumenta. Tal aparente contradição pode ser explicada, considerando a expansão do concreto fresco gerada pelo crescimento dos cristais de etringita e portlandita, ou ainda pelo inchamento dos cristais de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) que adsorvem a água. Assim, quando o concreto é curado em água, não apresenta contração do seu volume aparente, mas de fato, o seu volume absoluto diminui (AİTCIN, 1998).

A retração do concreto não é um fenômeno singular, podendo ser dividida em cinco tipos distintos: retração plástica, retração por secagem, retração autógena, retração térmica e retração por carbonatação. Cada um destes fenômenos ocorre em magnitude e tempos particulares, dependendo de diversos fatores intrínsecos aos materiais utilizados, suas proporções e condições de exposição ao

ambiente. Assim, para cada tipo de retração, há diferentes mecanismos atuantes e diferentes maneiras de combate, levando a crer na conveniência de falar-se em retrações, ao invés de retração. À soma de todas as retrações ocorridas no material cimentício, dá-se o nome de retração total.

2.1.1 Retração plástica

Ocorre quando a mistura, ainda no estado fresco, perde água de amassamento por evaporação. A magnitude da retração plástica é afetada pela quantidade de água perdida pela superfície do concreto, a qual é influenciada pela temperatura, umidade relativa (UR) do ambiente e velocidade do vento. Entretanto, a taxa de evaporação sozinha não permite prever a magnitude da retração plástica, a qual também depende da rigidez do concreto fresco (AÏTCIN et al., 1997). A formação de fissuras, provenientes da retração plástica, ocorre porque a tensão superficial da água dos poros capilares forma meniscos que, por sua vez, geram tensões capilares críticas na fase da pasta endurecida.

Basicamente, a fissuração por retração plástica ocorre quando a taxa de evaporação é superior à taxa de exsudação. Nos concretos de alto desempenho a exsudação é muito baixa, dado o extremo refinamento dos poros e pequena quantidade de água livre. Quando a quantidade de água perdida pela superfície do concreto é superior à quantidade que ascende por exsudação, a retração plástica pode acontecer. Assim, a exsudação combate à retração plástica (NEVILLE et AÏTCIN, 1998).

A exsudação pode ser medida qualitativamente como a percentagem de água que aflora em relação à água total da mistura, podendo chegar a 20% em casos extremos (HASPARYK et al., 2005). A medida da evaporação pode ser realizada pela diferença de massa da amostra, e atualmente de maneira muito simples com o aparato *Curing Meter* (Figura 1), desenvolvido por Jensen e Hansen (2006).

O concreto convencional apresenta uma vantagem no que se refere ao combate da retração plástica: a água proveniente da exsudação atua como uma proteção natural (cura) frente à evaporação. Enquanto isso, no concreto auto-adensável a alta quantidade de finos e o emprego de promotores de viscosidade retém a maior parte da água do sistema. Os altos teores de superplastificantes empregados retardam a pega. Isto aumenta igualmente o efeito da evaporação, e conseqüentemente a amplitude da retração plástica (TURCRY, 2003). Isto explica a

importância da problemática para os concretos e argamassas de alta resistência, para os quais a taxa de exsudação é mínima.

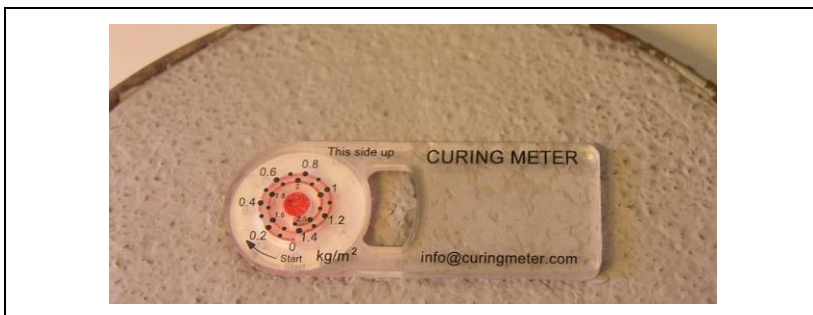


Figura 1 – *Curing Meter*. O dispositivo, desenvolvido por Jensen e Hansen, possibilita a medida instantânea da taxa de evaporação, e deve ser posicionado sobre a superfície da amostra.

Como resultado da retração plástica, várias fissuras superficiais podem aparecer nas faces expostas ao ar. Em geral, estas fissuras não são suficientemente profundas a ponto de causarem danos à estrutura, e podem ser eliminadas por retoques no desempenho. Todavia, as fissuras oriundas da retração plástica podem ser particularmente críticas quando dadas em elementos de pouca espessura, como por exemplo em argamassa para reparos e revestimento. Neste caso, ainda que a evaporação seja limitada, pode haver a formação de fissuras nocivas pela ação da retração plástica (JENSEN, 2006a).

2.1.2 Retração autógena

O adjetivo “*autógeno*” designa, neste contexto, certo estado termodinâmico: um sistema está sob condições autógenas quando não perde ou ganha massa, não sofre variações térmicas e nem está submetido a forças externas. O termo “*deformação autógena*” refere-se à deformação que ocorre sob as condições acima mencionadas. Portanto, o conceito de retração autógena não está em momento algum relacionado ao tempo de pega do concreto.

Na literatura há grande confusão na definição de conceitos relacionados aos fenômenos autógenos. Jensen e Hansen (1996) classificam de maneira simplificada os termos mais utilizados na literatura para a abordagem deste tema (Figura 2). Esta é a terminologia adotada neste trabalho.

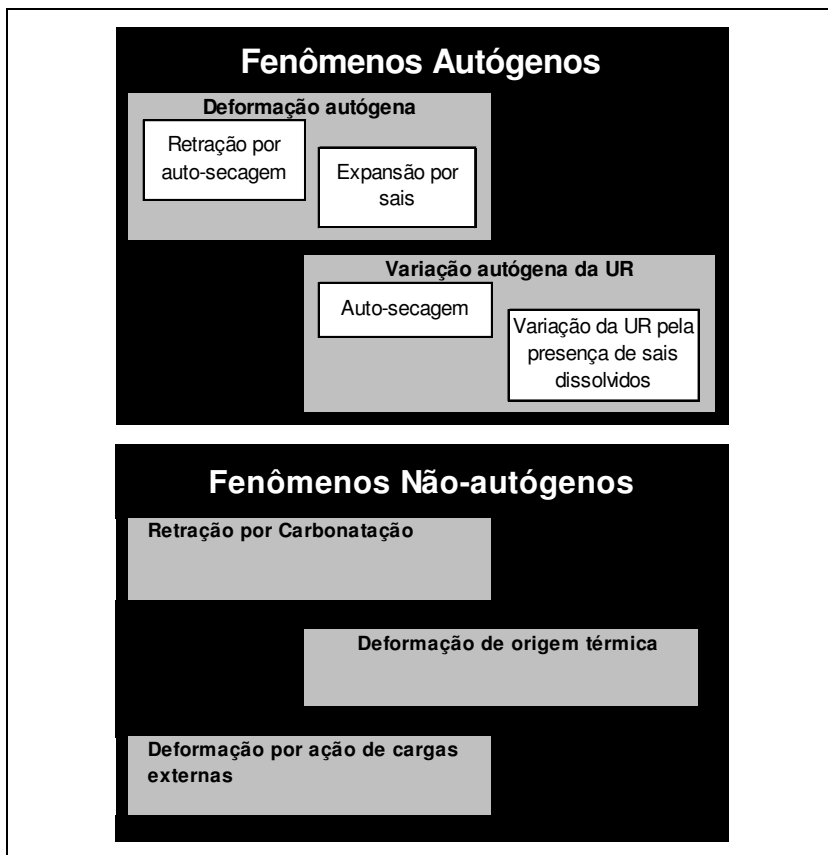


Figura 2 – Terminologia relacionada aos fenômenos autógenos e não-autógenos (Adaptado, Jensen e Hansen 1996).

Deformação autógena: deformação volumétrica da pasta de cimento em um sistema fechado e isotérmico;

Retração química: é também conhecida como contração de Le Chatelier, e consiste na redução do volume interno associada à hidratação do cimento Portland. O fenômeno se dá devido ao fato de que os produtos do cimento hidratado têm volume inferior ao do cimento anidro mais a água que com ele reage.

Retração por auto-secagem: retração volumétrica da pasta de cimento em um sistema fechado e isotérmico, causada pela retração química;

Mudança autógena de umidade relativa: mudança da UR interna da pasta de cimento em um sistema fechado e isotérmico;

Auto-secagem: diminuição da UR interna da pasta de cimento em um sistema fechado e isotérmico, causada pela retração química.

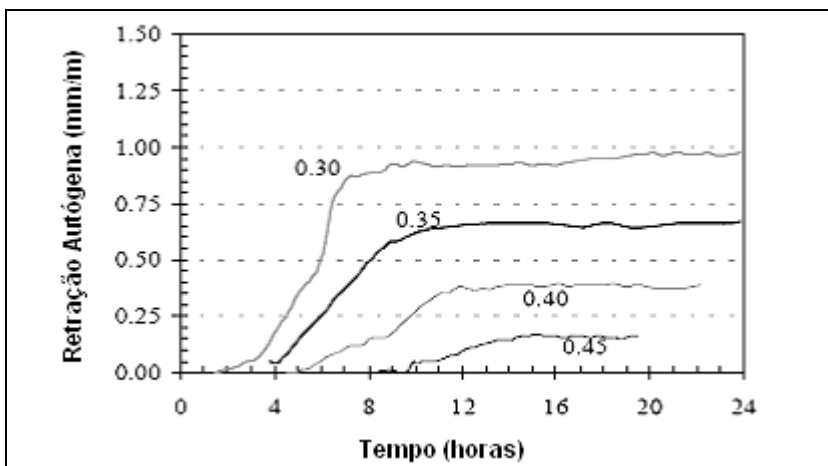


Figura 3 – Medidas de retração autógena em amostras de argamassa, com diferentes relações a/c e quantidades equivalentes de água (Adaptado: HOLT, 2002).

A retração autógena é consequência da remoção da água dos poros capilares pela hidratação do cimento anidro (a auto-secagem). A remoção da água dos poros maiores pouca ou nenhuma influência tem sobre o fenômeno. Isto explica porque o fenômeno é geralmente desprezado nos concretos e argamassas convencionais, onde os poros não são muito refinados, mas é nocivo aos concretos e argamassas de alta resistência, com baixa relação água/ aglomerantes (inferior a 0,40) e adições como a sílica ativa. A Figura 3 apresenta um exemplo de influência da relação a/c na magnitude da retração autógena, em argamassas estudadas por Holt (2002).

Os mecanismos que conduzem à retração autógena são ainda parcialmente entendidos. Enquanto se aceita que há uma relação entre retração autógena e variações na umidade relativa (UR) nos poros da pasta endurecida, os mecanismos de atuação no fenômeno ainda estão em discussão (LURA, 2003).

A comunidade científica ainda não entrou em comum acordo também quanto ao momento em que se deve iniciar a medida da retração

autógena: o chamado tempo-zero (t_0). Até o presente, diversos métodos vêm sendo utilizados na tentativa de identificar o t_0 , como por exemplo, testes de: penetração (ex.: agulha de Vicat), taxa de evolução do calor, medidas de retração, condutividade elétrica, medidas de ultra-som, evolução da resistência, etc.

Dentre os métodos acima citados, o teste de penetração é o mais utilizado na determinação do t_0 , mas a falta de um consenso na determinação torna difícil a comparação de resultados das pesquisas sobre retração autógena. Para as misturas com relações água/aglomerantes muito baixas, ou com adições de sílica ativa, as depressões dos meniscos (fator diretamente influente na retração) são substanciais já no início da pega, fato negligenciado quando se utiliza o teste de penetração. Enquanto isso, para concretos com maior exsudação, o surgimento dos meniscos dá-se após o início de pega.

Pesquisadores chineses vêm desenvolvendo um sistema especial para determinação do tempo-zero. Trata-se de um tensiômetro modificado, para monitorar a depressão dos meniscos e as mudanças de UR interna do concreto. Este método permite, com grande precisão, detectar variações mínimas da depressão dos meniscos, em idades muito pequenas do concreto. Os mesmos pesquisadores afirmam que, muito embora a retração autógena seja de pequeníssima magnitude neste estágio da hidratação, é possível perceber drásticas diferenças no desenvolvimento dos meniscos pela utilização do método proposto (JIA-PING et al., 2006).

2.1.3 Retração por secagem

O estudo dos mecanismos envolvidos na retração por secagem requer o entendimento dos diferentes tipos de água existentes no concreto. Esta classificação da água está diretamente relacionada ao grau de dificuldade com que ela pode ser removida (METHA et MONTEIRO, 1994).

Quanto à atuação na pasta, a água presente nos macro poros pode ser tida como água livre, pois não causa variação de volume, enquanto a água contida nos capilares pequenos (5 – 50nm) pode ocasionar retração do sistema. A retirada da água livre não traz danos ao material, mas a remoção da água retida por tensão capilar pode gerar retração. A água adsorvida está fisicamente presa à superfície do sólido, devido à influência de forças de atração que, quando cessadas, ocasionam a retração da pasta por secagem. A água adsorvida da pasta pode ser

perdida facilmente, por secagem da pasta a UR igual ou inferior a 30%, e é o principal fator responsável pela retração por secagem.

A retração por secagem difere da retração plástica por ocorrer após o fim da pega. Também consiste na perda de água por evaporação, em ambientes cuja UR é inferior a 100%. Porém, no caso da retração por secagem, a água perdida é aquela presente no interior dos poros do concreto ou argamassa após o fim do período de pega.

Uma maneira de prevenir a retração por secagem é a cura, que deve ser iniciada tão logo iniciem as reações de hidratação do cimento. Atenção especial deve ser dada quando da utilização de cimentos de alta resistência inicial. O procedimento de cura eficiente, no combate à retração por secagem, não precisa contemplar o suprimento de água para ser absorvida pelo material, mas simplesmente deve impedir a perda de água da superfície do mesmo. Portanto, a simples utilização de membranas impermeáveis para proteção da superfície exposta deve ser eficaz no combate à retração por secagem.

2.1.4 Retração térmica

Este fenômeno ocorre quando o material é submetido a variações de temperatura, e pode ocorrer tanto nas primeiras idades como ao longo de toda sua vida útil.

Quando a variação de temperatura é muito brusca e quando existem gradientes de temperatura ao longo da seção transversal de uma peça, a variação térmica causa problemas.

Durante as primeiras idades a hidratação do cimento causa o aumento de temperatura, e conseqüentemente expansão térmica. Assim sendo, quanto mais rico em cimento um material, mais este estará susceptível a este fenômeno. Normalmente este acréscimo de temperatura ocorre até as primeiras 12 horas após a mistura, caso não haja condições que retardem a hidratação.

Durante o resfriamento o material tende a voltar ao seu tamanho original. Quando a dilatação não é em sua totalidade elástica, a parte da deformação que seja inelástica resultará em retração. A situação é ainda mais crítica em peças espessas ($>1\text{m}$), em que o equilíbrio de temperatura entre a parte exterior e interior da peça leva muito tempo para ser obtido. Neste caso, o gradiente de temperatura causa tensões que podem levar à fissuração. Peças extremamente confinadas, onde pode não haver espaço suficiente para as variações volumétricas ocorrerem, podem também apresentar grandes problemas.

Cada material possui um coeficiente de dilatação térmica, o qual depende das propriedades individuais dos seus componentes. No caso de materiais heterogêneos como argamassas e concretos, também o teor de agregados e a relação água/cimento são fatores influentes. Da mesma maneira, nas primeiras idades o coeficiente de dilatação térmica muda rapidamente à medida que o cimento vai sendo hidratado.

Nas idades mais avançadas, a retração térmica é um fenômeno resultante das variações de temperatura do ambiente ao qual o material está exposto. Neste caso o material tende a fissurar caso as variações de temperatura sejam muito severas. Caso a temperatura seja tão baixa a ponto de causar congelamento, também o teor de água livre é muito importante, haja vista que o seu congelamento causa expansão.

2.1.5 Retração por carbonatação

Este tipo de retração é causado pela reação química de vários produtos de hidratação do cimento com o dióxido de carbono e a umidade da atmosfera. O material cimentício submetido à carbonatação perde água e comporta-se como se estivesse exposto a uma umidade relativa mais baixa do que a umidade a que está exposto (MINDESS e YOUNG, 1981 apud NUNES e FIGUEREDO, 2007). Normalmente, este tipo de retração limita-se à superfície do concreto, resulta em leve retração e decréscimo do pH. A profundidade de carbonatação varia também com a densidade do material e com as condições do ambiente em que ele se encontra.

O decréscimo do pH pode, por sua vez, comprometer a durabilidade da estrutura de concreto armado, uma vez que favorece a despassivação do aço. A armadura despassivada fica então vulnerável à corrosão, cujo produto expansivo pode causar fissuração do concreto.

2.2 *Materiais e influência nos diferentes tipos de retração*

2.2.1 Cimento e adições

Normalmente o consumo moderado de cimento limita a geração de calor na hidratação, a retração plástica e os custos com o material. Conforme o esperado, os cimentos de maior finura são mais indicados para produção de compósitos de maior resistência e também acarretam no maior refinamento dos poros, que por sua vez aumenta a retração autógena. Evidentemente, o uso de cimentos expansivos também contribui para uma menor magnitude de retração total.

Benz et al. (2001) estudaram a influência da distribuição granulométrica do cimento nas deformações autógenas às primeiras idades. Preparando pastas com cimentos de um mesmo tipo e diferentes finuras, os pesquisadores concluíram que há uma relação entre finura e retração autógena. As pastas preparadas com cimentos de maior finura apresentaram uma evolução de retração muito mais rápida que as pastas preparadas com cimento de menor finura. Os autores atribuíram o fenômeno ao refinamento dos poros proporcionados pela maior finura do cimento. As pastas com cimentos de menor finura apresentaram ainda ligeira expansão após o fim de pega, sendo que o início da sua retração é retardado e ao final os valores alcançados foram de menor magnitude.

Tazawa e Miyazawa desenvolveram muitos estudos relacionados à retração autógena. Dentre eles um artigo em especial (TAZAWA et MIYAZAWA, 1994) trata da influência do cimento e aditivos na retração autógena. Investigando diferentes composições de cimentos, com diferentes adições e também a utilização de diferentes aditivos, os pesquisadores concluíram dentre outras coisas que os valores de retração autógena obtidos por pastas preparadas com cimento de alta resistência inicial e com cimento aluminoso foram consideravelmente superiores aos valores alcançados pelas pastas preparadas com cimento de moderada liberação de calor e cimento do tipo belita (também com baixa liberação de calor). Do mesmo modo, o cimento com escória testado apresentou altos valores de retração autógena.

Alguns compostos minerais que compõem o cimento têm maior influência na magnitude da retração autógena, importando não somente os seus teores, mas também o grau de hidratação dos mesmos. Enquanto a maior quantidade e maior grau de hidratação dos compostos C_3A e C_4AF contribuem para altos valores de retração, os compostos C_3S e C_2S aparentemente não apresentam contribuição significativa. Estes fatos, verificados experimentalmente por Tazawa e Miyazawa (1994) e Jensen (2000) vão ao encontro da modelagem proposta por Paulini (1992), que demonstra como composição química do cimento afeta consideravelmente a retração autógena nas primeiras idades, por estar diretamente relacionada à retração química (Eq.1).

$$V_{RQ-Total} = 0,0532 \cdot [C_3S] + 0,0400 \cdot [C_2S] + 0,1113 \cdot [C_4AF] + 0,1785 \cdot [C_3A] \quad (\text{Eq. 1})$$

Onde:

$$V_{RQ-Total} = \text{volume de retração química total [cm}^3\text{/g];}$$

Gleize et al. (2006) estudaram especificamente os efeitos do metacaolim na retração autógena de pastas de cimento. Os resultados do estudo identificaram um decréscimo da retração autógena a longo-prazo quando da substituição de parte do cimento por metacaolim. Os autores atribuem grande parte desta redução à atividade pozolânica do metacaolim. Tazawa e Miyazawa (1994) testaram também a substituição parcial de cimento por metacaolim e por sílica em pó, revestidos com hidrofugante. Ambas as substituições reduziram a retração autógena. Especialmente o pó de sílica revestido com hidrofugante manteve o seu efeito de redução da retração autógena por longo período (até 100 dias). Este efeito pode ser atribuído ao aumento do ângulo de contato entre a fase sólida e a água contida nos poros da pasta de cimento, o que reduz a pressão negativa nos poros.

2.2.2 Aditivos super plastificantes

Quando utilizado com o intuito de aumentar a resistência do concreto, a sua utilização permite uma redução de, em média, 30% da quantidade de água da mistura, proporcionando maior trabalhabilidade com reduzidas relações água/cimento. Ao mesmo tempo, este aditivo permite uma subtração no consumo de cimento para que se alcance uma dada resistência e trabalhabilidade.

Segundo Ramachandran e Malhotra (1984), segregação e exsudação são conseqüências comumente observadas nos concretos fluídos com superplastificantes. Para combater os fenômenos, os autores afirmam que um teor mínimo de finos é necessário à mistura. Metha e Monteiro (1994) afirmam que o emprego de aditivos superplastificantes, por causar uma melhor distribuição das partículas constituintes da massa, resulta no maior refinamento dos poros. Assim, espera-se que o seu emprego conduza a maiores valores de retração.

Ao testar o efeito de superplastificantes em concretos auto-adensáveis de $a/c = 0,67$, Löfgren e Esping (2006) constataram que a retração plástica aumentou consideravelmente se comparada com a mistura referência, sem aditivo. Variando os teores de superplastificante, os pesquisadores observaram uma maior taxa de evaporação nas misturas com maior teor de aditivo. Este fenômeno é atribuído por eles ao retardo do fim de pega. Fontana e Meng (2006) observaram em seus estudos que o uso de superplastificantes retardou a pega e a hidratação das misturas. Os mesmos autores deduziram que, provavelmente por diminuir a tensão superficial na solução dos poros, os

superplastificantes propiciaram antes da pega menores valores de retração, se comparados com as misturas de referência.

Tazawa e Miyazawa (1994) estudaram pastas de cimento preparadas com diferentes aditivos superplastificantes em diferentes dosagens. Os pesquisadores concluíram que a utilização dos superplastificantes reduziu muito pouco a retração autógena das amostras. Ao testarem aditivos redutores de retração por secagem em amostras submetidas à condição autógena, os pesquisadores verificaram alguma eficiência no combate à retração autógena. Neste caso, o decréscimo percentual da tensão superficial da solução aquosa, causada pelo aditivo, foi semelhante ao decréscimo percentual de retração autógena (aproximadamente 50%).

2.2.3 Agregados

O emprego de agregados com maiores teores de finos conduzirá a misturas de poros mais refinados, o que influi sobremaneira nos fenômenos de retração. A forma e distribuição granulométrica dos agregados estão diretamente associadas ao empacotamento, e ao volume de vazios incorporados à mistura. Sua umidade e capacidade de absorção são características a serem também consideradas. O emprego de agregados leves proporciona a dosagem de concretos e argamassas mais leves, e ainda, quando saturados em água anteriormente à sua aplicação atuam como agentes de cura interna (MOHR et al., 2006). Contudo, remontando a Arquimedes no seu *Tratado dos Corpos Flutuantes*, corpos de menor densidade do que o fluido no qual estão imersos tendem a flutuar. Por isso, há que se controlar cuidadosamente a viscosidade da pasta quando da utilização de agregados leves, principalmente se não forem previamente saturados. Pastas de baixa viscosidade podem levar à segregação, por migração dos agregados leves à superfície.

2.2.4 Água de amassamento

A utilização de água de reciclagem, proveniente dos rejeitos da indústria concreteira, pode afetar a intensidade de retração. Neste caso, a caracterização e quantificação das partículas de finos e de cimento hidratado em suspensão na água devem ser ponderadas.

2.3 *Modelo de Powers e movimentação da água na pasta de cimento Portland*

Segundo AITICIN (1998), “O momento em que cessa a cura com água, a relação água/ aglomerante, e a quantidade e tipo de agregados vão determinar em grande parte a retração final do concreto”. Esta afirmação, aparentemente simplista, sobre o fenômeno da retração está parcialmente baseada em fundamentos complexos da hidratação do cimento. Para uma completa apreciação dos vários mecanismos de retração, é preciso antes compreender o processo de hidratação do cimento e suas consequências físicas, dinâmicas e termodinâmicas.

O modelo de estrutura da pasta de cimento portland endurecida, publicado por Powers-Brownyard em 1948 será brevemente explicado a seguir. Este modelo se refere ao cimento portland puro, e foi contestado por diversos autores desde sua publicação. Contudo, ainda hoje é considerado um dos poucos modelos capazes de explicar as propriedades físicas da pasta endurecida e o único modelo através do qual se pode determinar quantitativamente a sua composição volumétrica (HANSEN, 1986; TAYLOR, 1990, JENSEN, 2005).

Segundo Powers e Brownyard (1947), muitas características da estrutura da pasta de cimento endurecida dependem principalmente, não de sua composição química, mas sim do estado físico da fase sólida e da sua inerente atração pela água. As dimensões extremamente pequenas das unidades primárias da pasta, dos espaços intersticiais e a grande atração que as unidades sólidas exercem sobre a água contribuem para o fato de que variações na umidade do ambiente sejam sempre seguidas de variações na umidade da pasta endurecida. Além disso, estas variações de umidade afetam as variações volumétricas, resistência e o endurecimento da pasta.

No estado fresco, a pasta de cimento Portland é composta de grãos de cimento em solução aquosa. No estado endurecido esta estrutura é de natureza multifásica, composta de inúmeras unidades primárias interligadas, formando uma estrutura porosa. Os produtos de hidratação do cimento são densos, mas apresentam uma porosidade característica (os poros de gel). Esta substância densa e porosa é denominada gel de cimento, e sua composição consiste principalmente em silicatos de cálcio hidratados (C-S-H). As partículas que compõem o C-S-H são consideradas colóides, compostas por duas ou três camadas unidas, ordenadas de maneira que não podem ser consideradas cristalinas. O C-S-H é feito do arranjo aleatório destas partículas, que normalmente se ligam umas às outras por ligações fracas de Van der

Waals e ocasionalmente por ligações iônicas ou covalentes. O vapor de água pode penetrar todos os espaços entre as partículas componentes do C-S-H, e pode mover-se de modo reversível para o interior ou exterior. Entretanto, a água contida entre as camadas do C-S-H é mantida até que uma secagem muito intensa ocorra, sendo a sua perda irreversível (POWERS et BROWNYARDS, 1948).

Normalmente, a quantidade de gel de cimento não é suficiente para preencher todo o espaço, outrora ocupado pela água de amassamento, existente na pasta endurecida. Estes espaços remanescentes, não preenchidos pelo gel de cimento, são chamados poros capilares. Portanto, é a relação a/c que determina a porosidade capilar da pasta.

Desta forma, a pasta de cimento endurecida é constituída de gel de cimento (os produtos de hidratação), capilares (quando existentes), e grãos de cimento anidro (quando restantes). A porosidade total da pasta endurecida compreende, então, os poros capilares e os poros do gel (POWERS et BROWNYARD, 1948). Os poros de gel, dado seu diâmetro (\emptyset), são classificados como microporos ($\emptyset < 2\text{nm}$), e os poros capilares são classificados como mesoporos ($2 < \emptyset < 50\text{nm}$) ou macroporos ($\emptyset > 50\text{nm}$).

Também a água contida na pasta de cimento endurecida e saturada foi (empiricamente) classificada por Powers, conforme segue:

- Água não-evaporável, ou quimicamente combinada: refere-se à água que faz parte dos produtos de hidratação do cimento, e só pode ser perdida a partir da decomposição dos hidratos, pela elevação da temperatura acima dos 105 °C
- Água adsorvida ou água de gel: está fisicamente adsorvida nos poros do gel, ligada à superfície dos produtos de hidratação por meio de tensões superficiais. Não está disponível para o processo de hidratação, mas pode ser perdida durante a secagem.
- Água capilar: é uma solução de álcalis e outros sais, que pode estar livre nos macroporos, ou retida por tensão capilar no interior dos poros menores. É a única água disponível para dar continuidade às reações de hidratação dos grãos anidros e pode ser perdida durante a secagem.

Considerando a UR de 100%, Powers desenvolveu o seu modelo matemático para determinação do volume relativo das fases que compõem uma pasta de cimento hidratada: a água capilar (Eq. 2), água de gel (Eq. 3), sólidos de gel (Eq. 4), cimento anidro (Eq. 5), e a redução

de volume pela retração química (Eq. 6). Este modelo baseia-se nos seguintes parâmetros, resultantes da hidratação completa de 1g de cimento (valores que variam com a composição do cimento):

- A água não evaporável corresponde a aproximadamente 0,23g /g de cimento hidratado;
- A água de gel corresponde a aproximadamente 0,19g/ g de cimento hidratado, e;
- A retração química gera uma redução do volume da pasta de cimento de aproximadamente 6,4 ml para cada 100 g de cimento hidratado.

$$V_{AC} = p - 1,32 \cdot (1 - p) \cdot \alpha \quad (\text{Eq. 2})$$

$$V_{AG} = 0,60 \cdot (1 - p) \cdot \alpha \quad (\text{Eq. 3})$$

$$V_{GS} = 1,52 \cdot (1 - p) \cdot \alpha \quad (\text{Eq. 4})$$

$$V_{CA} = (1 - p) \cdot (1 - \alpha) \quad (\text{Eq. 5})$$

$$V_{RQ} = 0,2 \cdot (1 - p) \cdot \alpha \quad (\text{Eq. 6})$$

Onde:

V_{AC} = volume de água capilar [m³];

V_{AG} = volume de água de gel [m³];

V_{GS} = volume de sólidos de gel [m³];

V_{CA} = volume de cimento anidro [m³];

V_{RQ} = volume de retração química [m³];

p = porosidade inicial;⁴

α = grau de hidratação do cimento [kg de cimento hidratado/ kg de cimento anidro].

Pelo modelo, a hidratação completa só é possível quando a relação a/c for superior a 0,42 (=0,23+0,19). Se uma pasta de cimento endurece imersa em água, os vazios gerados pela retração química

$$^4 p = \frac{a/c}{(a/c) + (\rho_{\text{água}} / \rho_{\text{cimento}})}$$

Onde: a/c é a relação água/cimento [kg/kg]; ρ_{cimento} é a massa específica do cimento [kg/m³]
e $\rho_{\text{água}}$ é a massa específica da água [kg/m³]

poderão ser preenchidos com a água absorvida, que estará posteriormente disponível para a hidratação. Portanto, quando a relação a/c é inferior a 0,42 o acesso livre da água incrementará o grau máximo de hidratação do cimento. As relações volumétricas calculadas pelo modelo de Powers, para uma relação $a/c > 0,42$, em sistema sem perda de massa, estão explícitas na Figura 4.

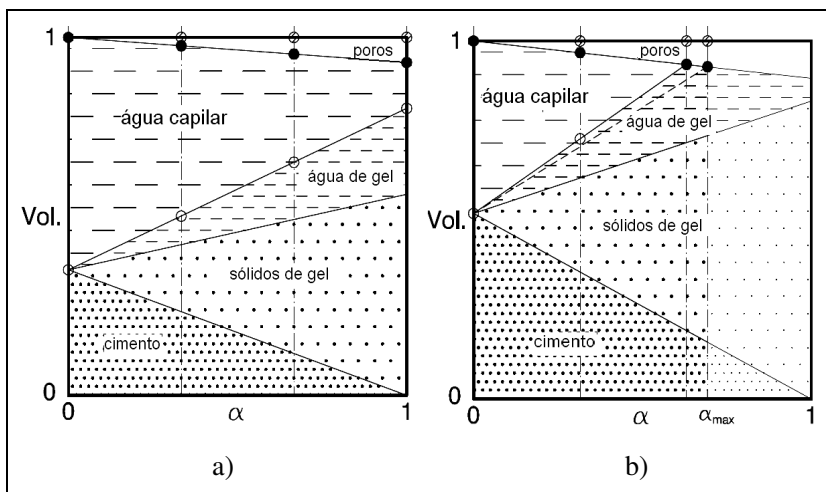


Figura 4 – Distribuição volumétrica de fases da pasta de cimento em função do grau de hidratação (α), em sistema fechado (livre de troca de umidade com o ambiente). Em a): para uma relação a/c de 0,60: dada a alta relação a/c ($>0,42$), a completa hidratação do cimento ($\alpha=1$) pode ser teoricamente obtida. Em b): para uma relação a/c de 0,30: dada a baixa relação a/c ($<0,42$), a completa hidratação do cimento ($\alpha=1$) não é possível, estando limitada a um grau máximo de hidratação (α_{max}) (Adaptado: JENSEN e HANSEN, 2001b).

O movimento da água na pasta de cimento é a base para o entendimento dos fenômenos de retração que serão abordados neste trabalho. As relações volumétricas expostas na Figura 4 quantificam de maneira satisfatória a demanda de água na pasta de cimento. A Figura 4 a) traz as relações volumétricas calculadas com o modelo de Powers, para uma pasta de cimento hidratada com relação $a/c > 0,42$. Neste caso, observa-se que todo o cimento alcança o grau máximo de hidratação ($\alpha=1$), restando ainda o excesso de água não-combinada acondicionada nos capilares. Por sua vez, a Figura 4 b) corresponde à pasta de cimento com relação $a/c < 0,42$. De acordo com as medidas tomadas por Powers e Brownyard (1948) há uma porosidade mínima, abaixo da qual o

crescimento das partículas de gel existentes e a formação de novas partículas são restritos por falta de espaço. Esta falta de espaço acontece quando há o consumo de toda a água capilar e ocupação dos espaços por água de gel, sólidos de gel e cimento anidro.

Mais adiante⁵ o modelo de Powers será retomado, em uma abordagem referente às pastas de cimento submetidas à cura interna com água incorporada.

Nos itens seguintes serão detalhados os mecanismos associados ao ganho ou perda de água.

2.3.1 Auto-secagem

A auto-secagem é a diminuição autógena da UR de um material cimentício após a pega, causada pela retração química que aumenta o volume de poros vazios e pelo consumo de água pelas reações de hidratação. Em outras palavras, graças ao fato de que os sólidos de gel ocupam menos espaço do que a água e o cimento anidro, poros preenchidos de gás são formados no interior do sistema fechado de pasta de cimento (JENSEN et HANSEN, 2001b). A formação de poros preenchidos de ar faz com que a UR decresça, o que aumenta as tensões capilares.

Enquanto a pasta de cimento é fluida, a retração química pode ser totalmente revertida em uma mudança no volume externo, já que a pasta não tem a capacidade de sustentar os vazios internos gerados. À medida que vai endurecendo, começam a se desenvolver no interior da pasta os caminhos de poros que já podem ser sustentados, e pouco a pouco vão sendo refinados

A Figura 5 ilustra as seguintes consequências do processo de hidratação (JENSEN, 2000a):

- a) redução da quantidade de água nos poros, pela incorporação aos produtos da hidratação;
- b) aumento da quantidade de matéria sólida;
- c) refinamento da estrutura de poros;
- d) formação dos poros vazios pela retração química;
- e) diminuição do raio de curvatura dos meniscos, e;

⁵ Vide item 2.7 Aplicação do modelo de Powers a amostras submetidas à cura interna por incorporação de água

f) grande retração gerada pelo aumento das tensões capilares nos poros: retração por auto-secagem.

Assim, a UR vai aos poucos decrescendo, e o aumento das “bolhas” de ar no interior da pasta possibilita a formação de mais e mais meniscos ar/água e o aumento das tensões capilares (Lei de Kelvin). A presença de meniscos também causa tensões hidrostáticas no fluido dos poros (Lei de Laplace). Neste estágio de hidratação, a rigidez da pasta é tão baixa e o comportamento viscoso é tão pronunciado que a menor tensão atuante no sistema é capaz de gerar grandes deformações. (HAGYMASSY et al. 1969 apud LURA, 2003).

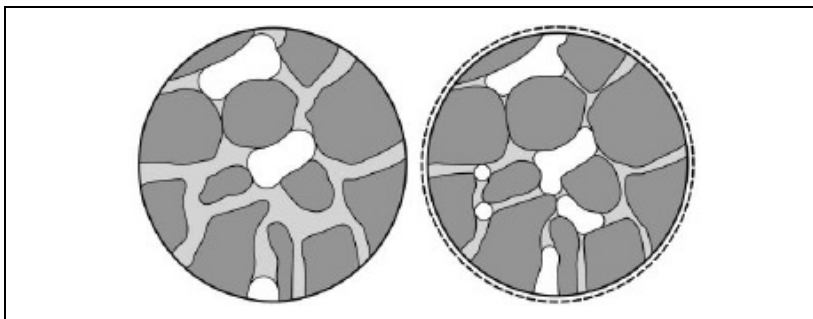


Figura 5 – Sessão transversal de uma pasta de cimento em processo de hidratação. À esquerda, baixo grau de hidratação. À direita, alto grau de hidratação. A matéria sólida (produtos da hidratação, cimento anidro, sílica ativa, etc.) é representada na cor cinza-escuro, a água dos poros em cinza claro e os poros vazios em branco. A linha pontilhada representa a circunferência original da seção (JENSEN, 2000a).

2.3.2 Tensão superficial

O desequilíbrio das cargas não-neutralizadas, presentes na superfície dos materiais, é a origem da tensão superficial. A tensão superficial dos sólidos está fortemente relacionada à sua superfície específica, e é diminuída pela ligação com outras moléculas, que são atraídas pelas ligações atômicas não-saturadas da superfície do sólido. Este desequilíbrio de forças gera tensões na superfície livre do material, ou na sua interface com outros materiais.

Quando a interface é do tipo sólido-líquido, a tensão superficial provoca a compressão do sólido. A adsorção de moléculas de água na superfície de um sólido é capaz de neutralizar, em alguma extensão, a tensão superficial na superfície deste sólido. Quando ocorre a secagem

desta superfície, a remoção das moléculas de água nela adsorvidas aumenta a tensão superficial entre a água e a superfície sólida, provocando uma compressão na superfície sólida. O resultado desta tensão de compressão é a contração da massa sólida (MELO NETO, 2002).

O mecanismo de tensão superficial contribui para apenas uma parte da retração total, pois atua nos sólidos somente, e indiretamente no corpo poroso como um todo. Contudo, a importância relativa da tensão superficial é mais alta quanto menor a UR. % (LURA, 2003). Este mecanismo não tende a ser o principal dentre os demais envolvidos na deformação autógena em locais onde normalmente a UR não cai abaixo de 75.

2.3.3 Pressão de separação

Na estrutura da pasta de cimento, a água está adsorvida nos pequenos espaços, nas partículas, e nas superfícies do C-S-H, seja qual for a UR. A espessura do filme de água adsorvida aumenta com o aumento da UR. Admite-se que, na pasta de cimento, muitos dos vazios sejam limitados por superfícies tão próximas, que não se pode a eles aplicar a teoria da depressão capilar. Quando a UR aumenta, tamanha proximidade das paredes pode não comportar mais o aumento da espessura do filme. Assim, são geradas tensões de separação (Figura 6), impedindo que as superfícies se aproximem e causando expansão (MOKAREM, 2002).

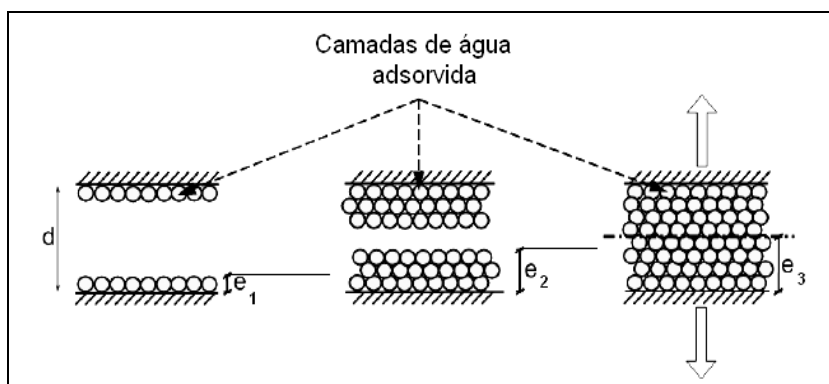


Figura 6 – Representação esquemática da pressão de separação (Adaptado: CHARRON, 2002).

Esta pressão, chamada pressão de separação, é ativa quando a distância entre as superfícies sólidas é inferior a duas vezes a espessura do filme de água adsorvida. Conseqüentemente, quando a UR diminui, a pressão de separação tende a diminuir também, o que leva à retração da pasta. Este mecanismo é mais pronunciado a partir da UR de 40%, sendo máximo quando aos 100% de UR (FERRARIS et WITTMANN, 1987). Apesar de ser um efeito conhecido teoricamente, ainda não se pode exprimir com exatidão a relevância da pressão de separação na retração da pasta (NAWA et HORITA, 2004).

2.3.4 Tensão Capilar

A tensão capilar é aquela à qual está submetido o líquido no interior de um poro capilar semi-saturado. Ela resulta da diferença entre a pressão do fluido sobre a parte côncava do menisco (P_a) e do fluido abaixo do menisco (P_w) (Figura 7). No caso da pasta de cimento endurecida, o fluido acima da concavidade do menisco é o ar, enquanto que o fluido abaixo dele é a água.

Como resultado da tensão capilar, pode haver deformações quando da perda desta água, quer seja para o ambiente, quer seja para as reações de hidratação.

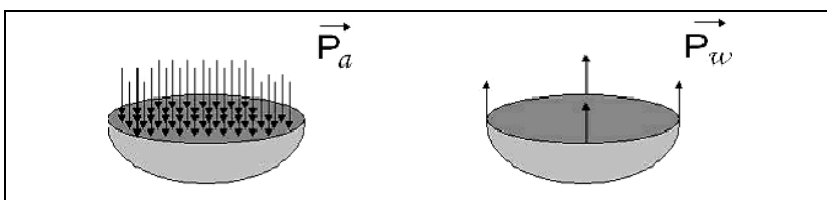


Figura 7 – Representação de uma calota esférica em repouso, submetida a dois tipos de força sobre ela, com mesma direção e sentidos opostos: tensão (P_w), aplicada em sua parede, e uma força que resulta da pressão aplicada na massa de ar contida na calota (P_a).

O equilíbrio de tensões (Eq. 7) é a base da equação de Laplace (Eq. 8).

$$P_a \cdot (\Pi \cdot r^2) = P_w \cdot (2 \cdot \Pi \cdot r) \quad (\text{Eq. 7})$$

$$P_w = \frac{2 \cdot P_a}{r} = \frac{2 \cdot \gamma_w \cdot \cos \theta}{r}$$

(Para líquido molhante $\rightarrow \cos \theta = 1$)

$$P_c = P_a - P_w \quad (\text{Eq. 8})$$

$$P_c = \frac{-2 \cdot \gamma_w \cdot \cos \theta}{r}$$

Onde:

P_a = pressão do ar [Pa];

P_w = pressão da água [Pa];

r = raio principal da superfície [m];

θ = ângulo entre a face do tubo em contato com o líquido e o menisco formado

P_c = pressão capilar [Pa];

γ_w = tensão superficial da água (aproximadamente 0,074 N/m);

r_1 e r_2 = raios principais do capilar [m].

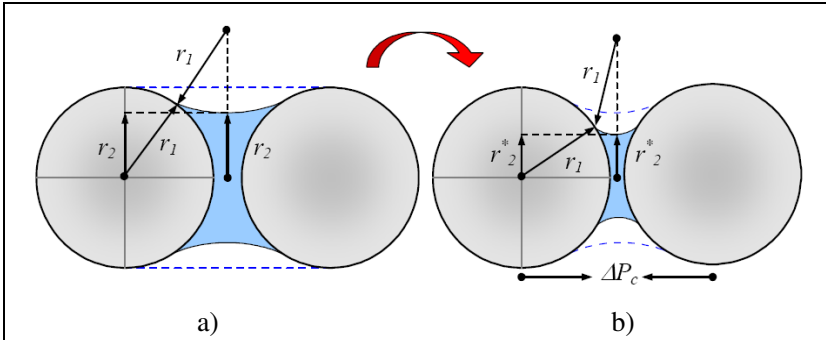


Figura 8 – Representação esquemática do efeito da perda de água capilar. Em a): o espaço entre as duas superfícies esféricas, não está totalmente preenchido com água (linha pontilhada), mas sim parcialmente preenchido, e submetido a tensões capilares. Em b): a perda de água faz com que aumente o raio de curvatura do menisco, gerando uma contração por variação da tensão capilar (ESPING, 2007).

A equação de Laplace admite que o menisco corresponda a uma calota esférica, correlaciona a pressão capilar (P_c) com o raio do capilar (r), como indica a Figura 8, adaptada de ESPING (2007).

Para estabelecer a analogia da equação de Laplace no concreto, admite-se que o capilar não tenha diâmetro constante, e que o líquido abaixo da cavidade do menisco seja a água (Eq. 9):

$$P_c = -\gamma_w \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (\text{Eq. 9})$$

(Para poro não – cilíndrico $\rightarrow r_1 \neq r_2$)

(Para líquido molhante $\rightarrow \cos \theta = 1$)

A pressão capilar corresponde à pressão do líquido que se encontra no interior dos capilares. A redução da pressão capilar conduz à retração, e está fundamentalmente ligada à UR interna do poro (Figura 8). A equação de Kelvin relaciona a pressão capilar com a UR (Eq. 10).

$$\ln(RH) = -\frac{2 \cdot \gamma_w \cdot M_w}{\rho_w \cdot R \cdot T \cdot r} \quad (\text{Eq. 10})$$

(Para poro não – cilíndrico $\rightarrow r_1 \neq r_2$)

$$\ln(RH) = -\frac{2 \cdot \gamma_w \cdot M_w}{\rho_w \cdot R \cdot T} \cdot \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

Onde:

R = constante universal do gás ideal (aproximadamente 8,314 J/mol.K);

T = temperatura absoluta [K];

M_w = massa molar da água (aproximadamente 0,018 kg/mol);

ρ_w = densidade da água;

RH = Umidade relativa [%].

Combinando as equações de Laplace e de Kelvin e, admitindo-se que $P_a = 0$ (pressão atmosférica) e que $r_1 = r_2$, obtém-se a seguinte expressão (Eq. 11) (ESPING, 2007):

$$P_c = \frac{\rho_w \cdot R \cdot T}{M_w} \cdot \ln(RH) \quad (\text{Eq. 11})$$

Esta equação (Eq. 11), mostra que qualquer pequena redução na UR levará a grandes aumentos da pressão capilar no poro. A variação da UR pode acontecer em consequência da auto-secagem ou pela evaporação da água para a atmosfera.

Baseando-se na suposição de que os poros capilares apresentem um tamanho típico entre 0,01 e 5 μm , a pressão capilar calculada pela equação de Kelvin (Eq. 10) estaria entre -10^{-2} MPa e -10 MPa. Caso os microporos de gel ($\varnothing < 2$ nm) fossem também considerados, teoricamente a pressão chegaria aos -100 MPa (ESPING, 2007).

Por outro lado, Powers (1968) concluiu que a máxima pressão capilar ($P_{c,máx}$) em uma pasta de cimento é inversamente proporcional à sua relação a/c (Eq. 12).

$$P_{c,máx} = -1 \cdot 10^3 \frac{\gamma_w \cdot S}{w/c} \quad (\text{Eq. 12})$$

Onde:

$P_{c,máx}$ = pressão máxima capilar [Pa]

S = superfície específica do cimento, medida pelo método de Blaine [m^2/kg]

Assim, admitindo-se um cimento com superfície específica de $350 \text{ m}^2/\text{kg}$ e uma relação a/c de 0,55 a pressão capilar calculada (Eq. 12) chega apenas a -47 MPa.

2.4 Ensaios para medida da retração

A medida da retração pode ser tomada de duas maneiras fundamentalmente distintas: medindo-se a retração linear ou medindo-se a retração volumétrica. Ambos os métodos têm suas vantagens e desvantagens. Além disso, pode-se optar por avaliar amostras restringidas ou livres.

As medidas de retração plástica e de retração por secagem são geralmente realizadas em prismas, como proposto pela ASTM C157 (2004). Os corpos de prova prismáticos são moldados em fôrmas metálicas de alta rigidez, em contato com transdutores de deslocamento – ao conjunto, chamaremos de *bancada de retração*. Na Figura 9 é possível visualizar uma bancada de retração para amostras de concreto, com transdutores de deslocamento a laser (TOUCRY et LOUKOLI, 2006).

Normalmente pelo menos os deslocamentos axiais são medidos, mas também é louvável o acompanhamento de abatimento das amostras pela instalação de, ao menos, um transdutor para monitoramento da face superior da peça. Também a retração autógena pode ser medida por meio destes aparatos, contanto que as amostras e aparato estejam mantidos em condições autógenas. A partir do momento em que os corpos-de-prova são retirados da bancada de retração, o acompanhamento de variações de medida linear pode ser feito em outro equipamento como o quadro de retração sugerido pela ASTM C157 (2004).

A medida volumétrica da retração autógena é realizada geralmente através de balões de borracha suficientemente resistentes (preservativos, por ex.), preenchidos com pasta de cimento fresca (Figura 10), e imersos em meio líquido.

A partir daí, a medida de retração autógena é feita pela variação de nível do líquido onde o balão está imerso. Uma vantagem deste método é a possibilidade de iniciar as medidas de retração imediatamente após o preparo da mistura e a exsudação indesejada pode ser evitada pela rotação dos espécimes. Dentre as desvantagens, podem ser citadas: a pressão exercida pela própria membrana sobre a amostra; a pressão que o líquido de imersão exerce sobre a amostra (quando este líquido é a água, trocas osmóticas de água podem ocorrer através da membrana). Durante a hidratação, a água de exsudação e o ar aprisionado no balão serão absorvidos novamente para o interior da pasta, como consequência da retração química. Como o volume do balão é a combinação dos volumes da pasta de cimento, mais a água de exsudação e o ar aprisionado, a redução de volume interno pode também ser erroneamente medida como uma deformação externa da amostra (JENSEN et HANSEN, 1996).

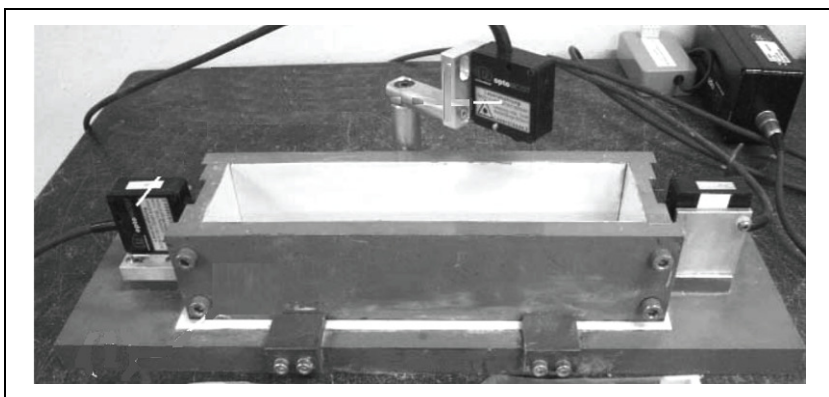


Figura 9 – Modelo de aparato para medição linear da retração. Nas extremidades do prisma e sobre o molde (preso por um braço metálico) estão alocados sensores de deslocamento a laser, ligados a um aquisitor de dados (ao fundo à direita) (Adaptado: TOUCRY et LOUKILI, 2004).

Lura e Jensen (2005) utilizaram preservativos de látex na realização de medidas volumétricas de retração autógena (Figura 10). Dois tipos de líquido foram testados para imersão das amostras: imersão em água e imersão em óleo de parafina. Paralelamente, as mesmas

misturas foram submetidas à medida linear da retração autógena. As amostras imersas em óleo de parafina não apresentaram quaisquer variações de massa durante a primeira semana de testes, e os resultados alcançados foram discrepantes se comparados com os de medida linear. As amostras imersas em água apresentaram absorção através da membrana, desde os primeiros instantes que sucederam a imersão. Tais resultados levam a crer que este tipo de técnica, destinado à medida volumétrica da retração, deve ser ainda melhorado, no intuito de aumentar a sua confiabilidade.

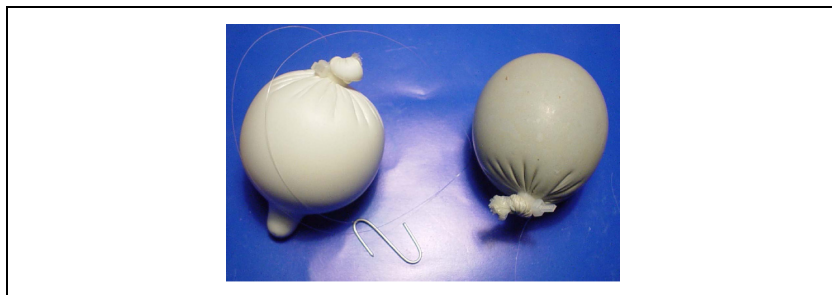


Figura 10 – Membranas de poliuretano com (à esquerda) e sem (à direita) reservatório, preenchidas com pasta de cimento (LURA et JENSEN, 2005).

A medida linear da retração autógena tem sido frequentemente realizada pela moldagem de tubos (rígidos e de baixo atrito) com pasta de cimento, em um tipo de aparato conhecido como *Dilatômetro* (Figura 11).

No *Dilatômetro*, a medida da retração é feita e registrada por transdutores de deslocamento. Uma vantagem do método linear é a possibilidade de iniciar as medidas imediatamente após a moldagem. Em contrapartida há a possibilidade de restrição da pasta de cimento, imposta principalmente pelo atrito do tubo com a superfície de apoio. Este problema pode ser amenizado pela lubrificação da face externa do tubo.

Sant et al. (2005) publicaram um artigo que trata da comparação e interpretação de diferentes ensaios para determinação de variações volumétricas de materiais cimentícios nas primeiras idades. Os autores compararam quatro métodos distintos de medida da retração autógena: imersão de amostras moldadas em membrana impermeável, medida linear com tubo corrugado, medida sem contato físico e o método proposto pela ASTM C157 (2004). A comparação das medidas de retração pôs em evidência uma boa correlação de resultados para os

métodos avaliados. Os autores atentam para a interpretação criteriosa dos dados obtidos pelo método ASTM C157, quando aplicado a misturas de baixa a/c. Uma análise descuidada dos resultados obtidos por este método leva a um retrato pouco acurado da retração nestes materiais. Isto porque este método não captura com significância a retração nas primeiras horas após a moldagem, ao contrário do que ocorre no teste com tubo corrugado. Quanto à utilização do teste de medida volumétrica por imersão, os pesquisadores observaram que a composição química e espessura da camada de líquido circundante, bem como a espessura da amostra ensaiada, são fatores influentes na medida de retração química. Quando os resultados obtidos pelos métodos de imersão e do tubo corrugado são comparados com os resultados da ASTM C157, uma observação relevante é feita: só é percebida uma correlação entre os resultados dos três métodos (antes da pega) quando considerada a deformação no sentido do abatimento do prisma (vertical), ao invés do deslocamento ao longo do eixo horizontal. Quando comparadas as medidas tomadas após o final de pega (medida pela agulha de Vicat), todos os ensaios apresentaram resultados semelhantes.

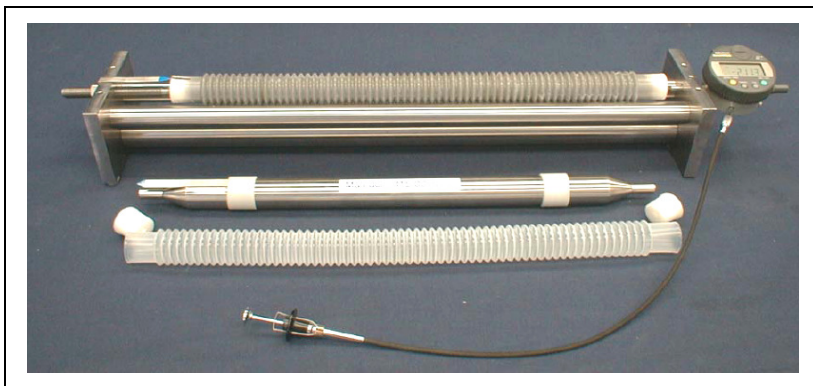


Figura 11 – Dilatômetro. Aparato utilizado na medida linear da retração autôgena, em tubos corrugados, preenchidos com material cimentício (LURA et al., 2006).

Neste trabalho foram utilizados dois tipos de ensaios de retração. O primeiro consiste no monitoramento da medida longitudinal de corpos de prova prismáticos (2,5 x 2,5 x 28,5cm) com transdutor de deslocamento. Neste método uma das extremidades do prisma permanece engastada durante todo o ensaio, enquanto a outra extremidade é livre para movimentar-se. Não é necessário o desmolde

do corpo-de-prova, e o monitoramento pode ser iniciado tão logo o este ofereça a mínima resistência mecânica. O transdutor de deslocamento permanece em contato com a extremidade livre. O segundo método adotado baseia-se na ASTM C490 (2003). Trata-se do acompanhamento da medida longitudinal de corpos-de-prova com relógio comparador. Neste caso, o monitoramento só pode ser iniciado quando o corpo-de-prova ofereça resistência suficiente ao desmolde. Maiores detalhes sobre os ensaios utilizados encontram-se neste trabalho no Capítulo 3.

2.5 Formas de combate à retração autógena e por secagem

Dentre as formas disponíveis de combate à retração, pode-se citar a utilização de:

- cimentos expansivos: a citar os tipos K, M e S (designados pela ASTM C 845) que, pela formação de etringita, provocam a expansão da pasta. Contém teores mais altos de cal livre e de aluminato e sulfato de cálcio;
- aditivos expansivos: como os à base de cal ou de sulfoaluminato de cálcio (CSA). Agem pela formação de etringita durante a hidratação (MAILVAGANAM, 1984);
- aditivos redutores de retração: são aditivos de base glicol, que atuam diminuindo a tensão superficial da água (REPETTE, 1999);
- aditivos compensadores de retração: são aditivos de base CSA, que promovem a formação de etringita (REPETTE, 1999);
- aditivos aceleradores de pega: promovem o ganho de resistência da pasta e diminuem a retração autógena (ESPING et LÖFGREN, 2006).
- precauções na composição da mistura: maiores teores de agregado graúdo e maior relação a/c, por exemplo, são favoráveis à menor incidência de retração;
- incorporação de fibras à mistura: de natureza metálica ou polimérica, as fibras dispersas na mistura contribuem para o combate à retração (GRZYBOWSKI et SHAH, 1990; RAZAVI-NOURI ET MORSHEDIAN, 1995);
- cura: consiste em proporcionar umidade e temperatura adequadas, de modo a prevenir a perda de umidade da pasta.

Neste trabalho, o método de combate à retração abordado será a cura interna com incorporação de água. Por isto, o método de combate

estudado é detalhado no subcapítulo 2.6, enquanto as demais formas de mitigação não serão aprofundadas.

2.6 Cura

Para assegurar o desenvolvimento das características físicas do concreto ou argamassa endurecidos, como resistência mecânica e durabilidade, é preciso prover condições satisfatórias de temperatura e umidade ao material, principalmente no estado fresco e nas primeiras idades. Este processo, a cura, visa potencializar a hidratação do cimento e reduzir a retração. A prática da cura está atrelada a vários problemas práticos nos canteiros de obras, e ao emprego de várias horas de trabalho ao longo de dias.

A continuidade da cura é muito importante, e o seu início deve acontecer imediatamente após a moldagem. Realizar a cura tardiamente não supre a ausência de cura nos primeiros momentos após a moldagem, condenando o concreto a um desempenho limitado. A cura adequada pode reduzir drasticamente a retração do concreto, e quando nenhum tipo de cura é realizado, as consequências podem ser catastróficas (AİTCIN, 1998). A superfície de acabamento, particularmente, é afetada pela cura inapropriada. Fissuras, oriundas das diferentes temperaturas ao longo da seção transversal da peça de concreto ou argamassa, são muito freqüentes e deixam esta parte ainda mais susceptível à secagem. Contudo, é da superfície exposta que, normalmente, se espera o melhor desempenho: boa aparência, resistência ao desgaste, baixa permeabilidade, etc.

Em suma, uma cura adequada contempla o controle da temperatura e da umidade interna do material cimentício. Quando a temperatura está abaixo de 5 °C, as reações de hidratação são prejudicadas, e quando muito elevada pode prejudicar a resistência mecânica. O problema da perda de umidade se deve ao fato de que é praticamente impossível re-saturar o concreto, argamassa ou pasta de cimento, a não ser em laboratório (JENSEN, 2006b)

Especialmente os concretos e argamassas de alta resistência têm suas características influenciadas pela cura, por não disporem em sua composição da quantidade mínima de água necessária para a total hidratação.

A RILEM possui um comitê técnico direcionado aos estudos da cura interna do concreto, composto por 37 pesquisadores de 17 países. Este comitê (196-ICC) classifica a cura do concreto em dois tipos principais (cura externa e cura interna), e as subdivide em mais quatro

tipos (Figura 12). A seguir, estes conceitos serão explicados conforme as definições propostas pela RILEM (2004a).

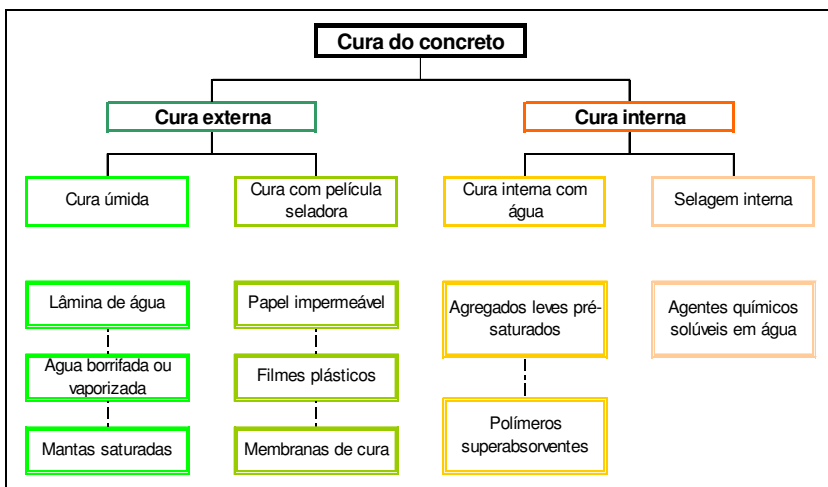


Figura 12 – Classificação dos métodos de cura do concreto (Adaptado, RILEM, 2004a)

A cura externa é aquela tradicionalmente realizada nos canteiros de obras, aplicada em todos os tipos de concreto. Em geral, pode ser subdividida em dois grupos:

- cura externa com água: consiste na aplicação de água ou vapor na superfície do concreto. Ex.: lâmina d'água, água borrifada ou vaporizada e mantas (sacos de aniagem, camada de areia, etc.) saturadas;
- cura externa com película seladora: consiste na aplicação de coberturas impermeáveis sobre a superfície do concreto. Ex.: papel impermeável, filmes plásticos e membranas de cura. As membranas mais utilizadas são formuladas a partir de resinas epóxi, ceras, poliuretano, ou borracha sintética dissolvidas em solvente volátil ou emulsificadas em água (ALMUSALLAM et al, 2002).

A cura interna consiste em adicionar, durante a mistura, materiais que atuarão como agentes de cura por tempo indeterminado. Este agente de cura interna pode ser, por exemplo, um agregado leve em condições especiais de umidade, ou ainda um componente extra à composição do concreto, como os polímeros superabsorventes (PSA).

A cura interna também pode ser subdividida em duas categorias:

- cura interna com água incorporada: na qual o agente de cura atua como um reservatório de água, que aos poucos é liberada. A água, neste caso, pode estar fisicamente absorvida no agente de cura (ex.: argila bentonita, PSAs) ou, fisicamente contida (ex.: argila expandida, pedra-pomes, diatomácea, perlita), ou não-consolidada a uma segunda substância (ex.:microencapsulada, emulsificada) (RILEM, 2004b). Uma mistura cimentícia submetida à cura interna com água incorporada tem, no seu estado fresco, cavidades preenchidas de água que atuam contra a auto-secagem. Durante a hidratação, tais inclusões com a água incorporada são esvaziadas, remanescendo por fim macro poros preenchidos com ar. Como em geral a presença de poros tem influência negativa nas propriedades da pasta de cimento, somente a quantidade de água suficiente para impedir a auto-secagem deve ser incorporada. A estimativa da quantidade de água necessária para tal pode ser estimada pelo modelo de Powers⁶ (JENSEN e HANSEN, 2001b).
- cura interna com agentes seladores (do inglês “*internal sealing*”): quando o agente de cura atua na prevenção ou no retardo da perda de água. Este tipo de aditivo é composto de polímeros solúveis que, quando dispersos na mistura de concreto, ligam-se á água por pontes de hidrogênio, formando um filme impermeável que reduz a taxa de evaporação pela superfície exposta (BASF, 2007). Há indícios de que estes aditivos alterem a morfologia do gel de C-S-H, reduzindo a permeabilidade do concreto (RAVINDRA et al., 1996).

Dos métodos de cura interna citados, a cura interna com água incorporada é a que melhor se aplica aos concretos de baixa relação a/c, haja vista que estes não possuem o mínimo necessário de água para promover a plena hidratação de todo o cimento⁷. Assim, pode-se adicionar uma quantidade extra de água à mistura e prevenir a diminuição da UR interna do sistema (resultante do fenômeno de auto-secagem), o que não é possível pelo uso de agentes seladores. Como o

⁶ Vide item 2.7 Aplicação do modelo de Powers a amostras submetidas à cura interna por incorporação de água

⁷ Segundo o método de Powers a menor relação a/c que possibilita a completa hidratação da pasta de cimento é igual a 0,42.

agente de cura interna fica disperso no interior do concreto, não há dificuldades de acesso ao interior das peças de baixa permeabilidade, problema este que a cura externa não consegue contornar (KOVLER et JENSEN, 2005).

A seguir, será descrito o polímero superabsorvente, agente de cura interna que será utilizado neste trabalho.

2.6.1 Polímeros superabsorventes

Os polímeros superabsorventes (PSA) estão no mercado desde 1978, quando surgiram no Japão como componentes de absorventes higiênicos femininos. A partir de 1980 alguns países da Europa passaram a desenvolver este produto, a fim de aplicá-lo também às fraldas descartáveis. Kovler e Jensen (2005) citam que, ainda hoje, aproximadamente 85% da produção mundial são consumidos na produção de artigos para higiene. Todavia, outras aplicações como, por exemplo, próteses, hidroponia, combate a incêndios, combate à lixiviação do solo e à erosão de encostas também são frequentes. No Brasil este produto ainda não é produzido comercialmente, e nem mesmo a sua matéria prima básica, o ácido acrílico (LPC, 2006). No exterior, podem ser citados como maiores produtores de PSA as empresas AMCOL, Stockhausen GmbH, Dow Chemical, Hoechst Casella, Allied Colloids, e Nippon Shokubai (PYTLIK et al, 2000).



Figura 13 – Amostras de polímeros superabsorventes (PSAs) secos (acima) e saturados (abaixo) (TRAMFLOC, 2007).

Quanto à sua composição química, os PSAs são poliacrilatos interligados por ligações covalentes cruzadas, ou poliacrilatos/poliacrilamidas copolimerizados. Dada a sua natureza iônica e sua estrutura de ligações cruzadas, podem absorver grandes quantidades de água sem se dissolverem (Figura 13). Podem estar

disponíveis em diferentes formatos e tamanhos (pó, grãos, e partículas de tamanhos maiores) (TRAMFLOC, 2007).

O líquido absorvido pelo polímero não é liberado sob ação de pressão moderada, mas sim conforme a umidade relativa do ambiente em que se encontra. Diversos mecanismos estão envolvidos na transição da fase seca para a saturada. Em suma, a transição é resultado de um balanço das forças repulsivas que atuam expandindo a rede polimérica, e forças atrativas que agem encolhendo a rede. O interior do PSA possui uma alta concentração de íons, que induzem a entrada da água para seu interior por osmose. Outro fator contribuinte para o inchamento é a solução de grupos hidrofílicos na água, presentes ao longo de toda a cadeia polimérica. Ao mesmo tempo, a energia elástica das moléculas se opõe ao inchamento. A salinidade da solução aquosa tem uma importância especial para os PSAs, já que quando a concentração de íons fora do polímero aumenta a pressão osmótica dentro do gel diminui, reduzindo a capacidade de inchamento (JENSEN et HANSEN, 2001b).

Dentre as propriedades mais importantes para os PSAs aplicáveis na cura interna, pode-se citar a forma, capacidade de absorção de água, resistência e módulo de deformação do gel inchado. Todas as propriedades citadas dependem da densidade da rede de ligações cruzadas: o módulo de deformação aumenta e a capacidade de inchamento diminui com o aumento da densidade da rede. Geralmente, quanto maior o teor de água no gel, mais pobres serão suas propriedades mecânicas. Em tese, os PSAs utilizados para este fim podem absorver uma quantidade de água de até 5000 vezes o seu próprio peso seco, mas em soluções com grande quantidades de íons dissolvidos (como no caso do concreto) a capacidade de absorção limita-se a aproximadamente 20 vezes. Para o concreto, praticamente toda a água absorvida pelo PSA pode ser considerada como quimicamente disponível para reagir com o cimento (KOVLER et JENSEN, 2005). A Figura 14 contém uma representação de um grão de PSA seco e o mesmo grão saturado.

Normalmente as dimensões dos grãos de PSA utilizados para cura interna estão entre 125 e 250 μm no estado seco, e crescem aproximadamente 3 vezes quando saturados. Pesquisas indicam que há uma faixa ideal de tamanho de partículas de PSA, aproximadamente 100 μm no estado seco, para que tenham eficiência otimizada no combate à retração (Lura et al., 2006). Quando as partículas são maiores, estas podem não suprir todas as partes da pasta de cimento com água durante a hidratação. Partículas grandes podem também ter uma eficiência

reduzida pela falta de tempo suficiente para sua plena saturação durante a mistura. Em contrapartida, partículas extremamente pequenas podem ser também pouco eficientes pelo efeito de absorção de produtos de hidratação do cimento, ou pela menor atividade da superfície do polímero (JENSEN et HANSEN 2002). A distribuição granulométrica dos grãos de PSA influi ainda na reologia do material cimentício.

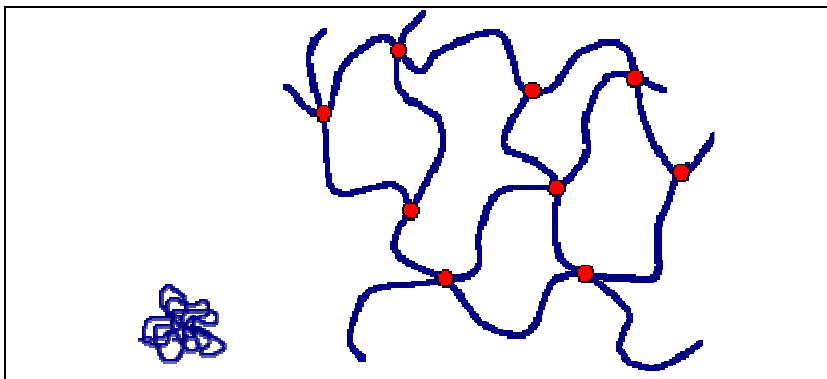


Figura 14 – Comparação entre um grão de PSA com ligações cruzadas seco (à esquerda) e saturado (à direita) (NARSAVAGE-HEALD)

Durante a concretagem, o volume de água a ser absorvida pelo polímero é normalmente adicionado à água de amassamento. As partículas de PSA formam macro-inclusões que absorvem água quando o concreto ainda está no estado fresco. O tempo demandado na saturação dos grãos de PSA está diretamente relacionado à sua distribuição granulométrica. Esta água absorvida (considerada como água livre) é consumida ao longo do processo de hidratação do cimento, promovendo a cura interna da pasta ao seu redor e prevenindo a auto-secagem. Jensen e Hansen (2001b, 2002) verificaram que, para um dado tipo de PSA utilizado em cura interna, mais de 50% da absorção máxima de água pelo polímero ocorre nos primeiros 5 minutos após a adição de água.

A utilização de PSAs para cura interna aumenta a porosidade final da pasta, o que normalmente diminuiria a resistência e durabilidade do concreto. Este aumento de porosidade pode ser estimado pela modelagem de Powers (Eq. 2), como será descrito no item 2.7. Porém, a natureza desta porosidade é significativamente modificada pela adição do PSA: os poros vazios, gerados pela auto-secagem numa pasta de cimento sem inclusão de PSA, são irregulares e parcialmente

conectados. Ao contrário, os poros vazios gerados em uma pasta modificada pela inclusão de partículas de PSA serão, em sua maioria, esféricos desconectados e de forma definida. Deste modo, espera-se que a durabilidade seja superior nas misturas com PSA. Com relação à resistência, é mais difícil prever a influência. Ao mesmo tempo em que o PSA aumenta o grau de hidratação do cimento, aumenta também a quantidade de sólidos de gel. Sendo os sólidos de gel muito menos resistentes que o cimento anidro, espera-se que isto diminua a resistência da pasta. Pesquisas experimentais ainda são necessárias para confirmar tais suposições (JENSEN, 2006b).

2.7 Aplicação do modelo de Powers a amostras submetidas à cura interna por incorporação de água

O modelo de Powers, citado no item 2.3, pode ser adaptado para situações de sistema aberto onde há cura externa com água ou mesmo cura interna com água incorporada.

Na Figura 15 está representado um diagrama de fases para uma pasta de cimento em tais situações (livre suprimento de água, que não a água de amassamento, durante as reações de hidratação). O diagrama foi feito com base numa relação a/c igual a 0,30 (água de amassamento) + 0,05 (água extra, destinada ao combate da auto-secagem), o que justifica a não-obtenção do grau máximo de hidratação (JENSEN e HANSEN, 2001b).

Jensen e Hansen, pesquisadores que em muito contribuem para os estudos da cura interna com incorporação de água, desenvolveram as equações⁸ propostas por Powers e Brownyard. Desta forma, chegaram às equações que possibilitam estimar a quantidade de água necessária de ser incorporada, para prevenção da auto-secagem. Em resumo, o desenvolvimento das equações segue o princípio de que (JENSEN e HANSEN, 2001b):

o volume inicial de água incorporada, $V_{ew,0}$, deve ser igual à retração química desenvolvida no grau máximo de hidratação do cimento.

Partindo de:

$$\{ \alpha = \alpha_{\max} \text{ para } V_{GW} + V_{GS} + V_{UC} = 1 \} \Rightarrow$$

⁸ Vide as equações 2 a 6, no item 2.3 Modelo de Powers e movimentação da água na pasta de cimento Portland

$$0,60 \cdot (1 - p) \cdot \alpha_{\max} + 1,52 \cdot (1 - p) \cdot \alpha_{\max} + (1 - p) \cdot (1 - \alpha_{\max}) = 1$$

em um sistema aberto, com baixa relação a/c

$$\alpha_{\max} = \frac{p}{1,1 \cdot (1 - p)} \quad (\text{Eq. 13})$$

$$V_{ew0} = 0,20 \cdot (1 - p) \cdot \alpha_{\max} = 0,18 \cdot p = 0,18 \cdot V_{cw0} \quad (\text{Eq. 14})$$

Utilizando a relação água/cimento [g de água/ g de cimento], a água incorporada $(a/c)_i$, (Eq. 15), e a água/cimento inicial (a/c) , (Eq. 16), podem ser expressas das seguintes maneiras:

$$\left(\frac{a}{c}\right)_i = \frac{V_{EW0} \cdot \rho_W}{V_{C0} \cdot \rho_C} \quad (\text{Eq. 15})$$

$$\left(\frac{a}{c}\right) = \frac{V_{CW0} \cdot \rho_W}{V_{C0} \cdot \rho_C} \quad (\text{Eq. 16})$$

Assim sendo, pela (Eq. 15) e (Eq. 16), a quantidade de água necessária para alcançar $\alpha_{\max} = \frac{p}{1,1 \cdot (1 - p)}$ é:

$$\left(\frac{a}{c}\right)_i = 0,18 \cdot \left(\frac{a}{c}\right), \text{ para } \left(\frac{a}{c}\right) \leq 0,36 \quad (\text{Eq. 17})$$

A (Eq. 17) só é relevante para $\left(\frac{a}{c}\right) \leq 0,36$. Acima desta relação a/c, a hidratação completa pode ser alcançada com menor quantidade de água incorporada do que a sugerida pela (Eq. 17). Segundo o modelo de Powers, o grau máximo de hidratação, α_{\max} , é possível na faixa de $0,36 \leq \left(\frac{a}{c}\right) \leq 0,42$ se :

$$\left(\frac{a}{c}\right)_i + \left(\frac{a}{c}\right) = 0,42, \text{ resultando em}$$

$$\left(\frac{a}{c}\right)_i = 0,42 \cdot \left(\frac{a}{c}\right), \text{ para } 0,36 \leq \left(\frac{a}{c}\right) \leq 0,42 \quad (\text{Eq. 18})$$

Como exemplo de aplicação da (Eq. 17), tomemos a situação exposta pela (Figura 15), com relação a/c igual a 0,30. Para tal, a (Eq. 17) sugere que o mínimo de água incorporada, necessária para obtenção

de $\alpha_{\max} = 1$ é $0,18 \cdot 0,30 = 0,054$ [g de água incorporada/ g de cimento].

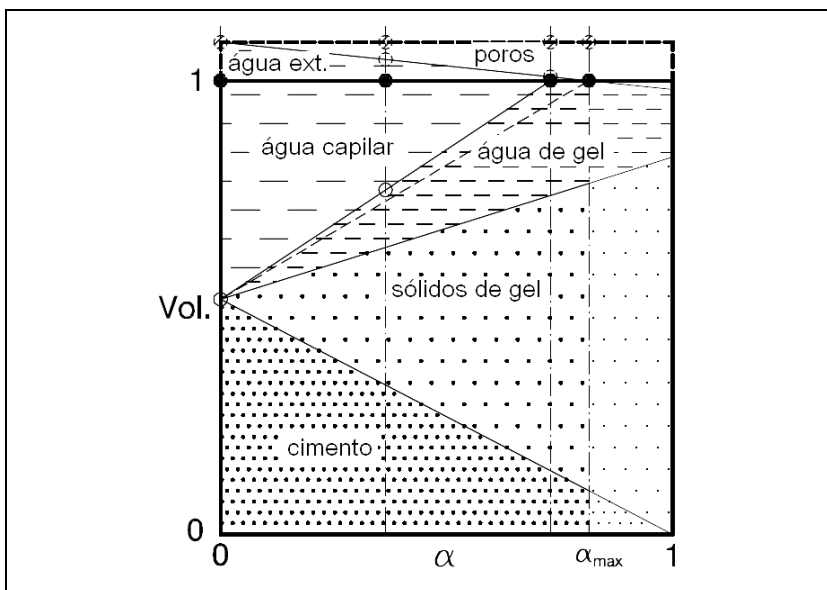


Figura 15 – Distribuição volumétrica de fases da pasta de cimento em função do grau de hidratação (α), em sistema fechado (livre de troca de umidade com o ambiente), para uma relação a/c de 0,30+0,05. Este diagrama é aplicável para a hidratação com um suprimento externo (ex.: cura externa em sistema aberto) ou interno (ex.: cura interna com água incorporada). Dada a baixa relação a/c, a completa hidratação do cimento ($\alpha=1$) não é possível (Adaptado: JENSEN e HANSEN, 2001b).

Com base nas (Eq. 17) e (Eq. 18), pode-se gerar um gráfico (Figura 16) que expresse o mínimo necessário de água incorporada, para obter α_{\max} e, assim, prevenir a auto-secagem.

No gráfico, o dado de entrada é a relação água/cimento (a/c) da mistura, e no eixo vertical encontra-se a relação água/cimento necessária para prover a cura interna. Na prática, a relação água/cimento final da mistura dá-se pela soma dos dois valores.

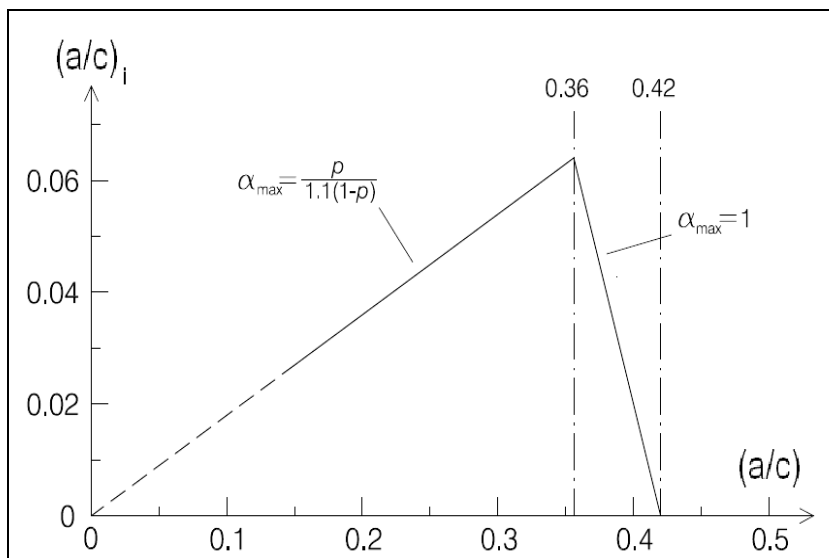


Figura 16 – Com base nas (Eq. 17) e (Eq. 18), o gráfico expressa o mínimo necessário de água incorporada, para obter α_{max} e, assim, prevenir a auto-secagem (Adaptado: JENSEN e HANSEN, 2001b).

2.8 Síntese da Revisão Bibliográfica

A retração autógena é definida como uma variação de volume que ocorre sem que haja troca de temperatura, e sem perda ou ganho de umidade e massa. As explicações existentes para o fenômeno da retração autógena baseiam-se em modelos de hidratação do cimento. Neste trabalho, os conceitos e quantificações que descrevem o fenômeno baseiam-se no modelo de Powers.

A mistura de cimento com água gera produtos de hidratação cujo volume é inferior ao da soma dos volumes da água mais cimento anidro. Este fenômeno (conhecido como contração de Le Chatelier) não pode, portanto ser combatido em nenhuma pasta de cimento. Como consequência, os vazios gerados pela contração de Le Chatelier proporcionam uma queda (autógena) da UR interna da pasta de cimento.

Esta queda de UR aumenta a tensão capilar nos poros semi-saturados, sendo aplicáveis as relações estabelecidas por Kelvin e Laplace. Com o aumento da tensão capilar as paredes do poro são forçadas a se aproximarem. Esta tensão de retração será ou não nociva dependendo da densidade da microestrutura da pasta, que é afetada pelas

características dos materiais utilizados (cimento, aditivos, adições) e proporções empregadas.

A utilização de PSA no combate à retração autógena tem se mostrado um método eficiente de minimização do fenômeno. Contudo, pouco é divulgado com relação aos efeitos da utilização do PSA nas propriedades mecânicas dos materiais, tais como resistência à compressão e módulo de elasticidade.

Na literatura não foram encontrados estudos sobre diferentes modos de adição do PSA à mistura de pasta, argamassa ou concreto de cimento Portland. É possível que certos modos de adição do polímero (seco, parcialmente saturado ou totalmente saturado) alterem os efeitos de combate à retração.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Este programa experimental foi desenvolvido visando avaliar os efeitos da cura interna com PSA no fenômeno da retração autógena de pastas de cimento, além de verificar os efeitos em características do estado fresco e na evolução da resistência à compressão até os 28 dias e no módulo de elasticidade. Note-se que ao longo deste capítulo a menção do termo “retração” refere-se ao fenômeno de retração autógena.

Para realização do programa experimental foi tomado um PSA especialmente destinado à cura interna, produzido na Alemanha por uma das empresas líderes em materiais químicos no mundo, BASF GmbH. A empresa ainda não disponibiliza este produto no mercado, por ainda estar em desenvolvimento. Até hoje, a grande maioria dos estudos publicados sobre combate à retração através de cura interna com PSAs advém de experimentos realizados com outro polímero, desenvolvido na Dinamarca pela empresa Densit A/S e tido como pioneiro nesta aplicação, que tem mostrado bons resultados. Muito pouco se sabe sobre a estrutura química de ambos os produtos, permanecendo suas fórmulas em sigilo industrial.

No início dos trabalhos em laboratório foram testados também polímeros de outras empresas, e fabricados para outros fins (higiene). No entanto, os resultados obtidos nos ensaios de retração demonstraram que tais polímeros não são eficientes para combater o problema.

Os ensaios relacionados ao acompanhamento da evolução da retração autógena de pastas de cimento são o principal foco deste programa experimental, sendo a sua análise apoiada em resultados de experimentos complementares ao entendimento dos fenômenos relacionados. Completam este estudo as verificações da influência dos teores de PSA e das formas de sua adição na resistência à compressão e no módulo de elasticidade.

O programa experimental foi dividido em duas partes. Na primeira avaliam-se os efeitos da inclusão de PSA, variando-se teor e modo de adição do polímero, como agente de cura interna no combate à retração autógena de pastas de cimento. Parâmetros como evolução da retração nas primeiras idades e evolução da umidade e temperatura das pastas foram mensurados. A segunda parte compreende a avaliação dos efeitos da cura interna com PSA na resistência à compressão e módulo de elasticidade de argamassas auto-adensáveis.

O ensaio de evolução da retração nos primeiros 3 dias de hidratação monitora com transdutores de deslocamento o

desenvolvimento da retração autógena durante o período crítico em que as cadeias de hidratos do cimento ainda não são suficientemente desenvolvidas para resistir às tensões de tração provocadas pela retração restringida. A partir do 3º até o 28º dia os resultados considerados são os obtidos pelo ensaio de retração com relógio comparador, que permite identificar as tendências de evolução da retração.

A resistência à compressão das misturas foi verificada por ser um dos principais indicadores de desempenho do concreto. Os resultados de resistência á compressão permitem uma avaliação prática da viabilidade de se utilizar o PSA como agente de cura interna. O ensaio de módulo de elasticidade, por sua vez, também contribui com informações para um futuro parecer de viabilidade do uso do PSA.

Todo o programa experimental foi desenvolvido no Laboratório de Materiais de Construção Civil da Universidade Federal de Santa Catarina.

As propriedades avaliadas neste estudo experimental foram:

- a deformação do tronco de cone das misturas frescas na mesa de abatimento;
- a massa específica das misturas frescas;
- a evolução da retração autógena desde as primeiras horas após a adição de água ao cimento e de 1 até os 28 dias;
- a evolução da resistência à compressão (fc) medida aos 3, 7 e 28 dias;
- o módulo de elasticidade (Eci) medido aos 28 dias.

A fim de compreender os diferentes comportamentos das misturas estudadas, no que concerne às propriedades citadas, foram realizados os seguintes ensaios complementares:

- determinação da variação de temperatura de amostras armazenadas em banho termostatzado, durante os 3 primeiros dias;
- determinação da variação de umidade de amostras armazenadas em banho termostatzado durante os 3 primeiros dias.

Um resumo do programa experimental pode ser observado no Quadro 1.

Ensaio	Amostra	Propriedades Avaliadas	Equipamentos	Idade da mistura	No. de amostras
Mesa de abatimento	pasta de cimento fresca	fluidez, exsudação e segregação	mesa de abatimento, inspeção visual do operador	imediatamente após o preparo	1
Massa específica		massa específica	copo metálico, balança		1
Evolução da temperatura		tempo zero a partir do qual é considerada a retração autógena	termopares do tipo K, aquisitor de dados, calorímetro semi adiabático		3
Medida da retração autógena com transdutor de deslocamento	corpos-de-prova prismáticos de pasta de cimento	retração autógena a partir do tempo zero	bancada de retração com sensores de deslocamento, aquisitor de dados	a partir do tempo zero até aproximadamente 3 dias	2
Evolução da temperatura		evolução da temperatura	termopares tipo K, aquisitor de dados	3 dias	1
Medida da retração autógena com relógio comparador	(2,5 x 2,5 x 28,5) cm	retração autógena após a desmoldagem e variação de massa	quadro de retração, relógio comparador, balança de precisão	a partir da desmoldagem até 28 dias	3
Acompanhamento da variação de UR no interior da pasta	pasta de cimento moldada em tubo de ensaio	taxa de evolução da UR interna das pastas de cimento em ambiente termostatizado	sensor de umidade, aquisitor de dados, banho termostatizado	a partir do tempo zero até aproximadamente 3 dias	2
Compressão axial	corpos-de-prova cilíndricos de (50 x 100) mm	resistência à compressão	prensa	3; 7 e 28 dias	2 aos 3 e 7 dias e 3 aos 28 dias
Módulo de deformação na compressão axial		módulo de deformação	suporte com par de relógios comparadores, prensa	28 dias	3

Quadro 1 - Resumo do programa experimental.

3.1 *Materiais, determinação dos traços e procedimentos de mistura*

3.1.1 Materiais

Foi utilizado nesta pesquisa o cimento de alta resistência inicial resistente a sulfatos (CPV-ARI-RS - ABNT NBR5733/91). A elevada finura deste tipo de cimento contribui para uma microestrutura de poros refinados na matriz cimentícia, favorecendo a ocorrência de retração autógena. As características físicas e químicas do cimento utilizado nos experimentos constam na Tabela 1 e na Tabela 2 respectivamente.

Tabela 1 - Características físicas do cimento. Dados fornecidos pelo fabricante. Cimento do tipo CPV-ARI-RS.

Item de controle		Unid.	Média	Desvio	Mínimo	Máximo
Ensaio Físicos	Material retido #200 (mesh)	%	0,11	0,04	0,00	0,29
	Material retido #325 (mesh)	%	1,59	0,43	0,71	2,45
	Blaine	cm ² /g	4916	102	49	5332
	Água de consistência	%	28,96	0,18	28,51	29,21
	Início de pega	horas	3:14	0:10	3:07	3:41
	Fim de pega	horas	4:11	0:10	4:02	4:41
	Expansibilidade a quente	mm	0,56	0,55	0,00	1,60
	Resistência R1	MPa	24,03	0,83	22,47	25,44
	Resistência R3	MPa	34,03	1,03	32,14	35,54
	Resistência R7	MPa	38,86	0,94	37,18	40,27
	Resistência R28	MPa	48,46	0,80	47,07	50,26

Tabela 2 - Características químicas do cimento. Dados fornecidos pelo fabricante. Cimento do tipo CPV-ARI-RS.

Item de controle		Unid.	Média	Desvio	Mínimo	Máximo
Ensaio Químicos	Perda ao fogo	%	3,52	0,20	3,20	4,00
	SiO ₂	%	23,62	0,35	22,78	24,37
	Al ₂ O ₃	%	7,45	0,24	6,98	7,86
	Fe ₂ O ₃	%	3,27	0,04	3,15	3,35
	CaO	%	51,62	0,52	50,53	52,59
	MgO	%	5,59	0,09	5,44	5,78
	K ₂ O	%	1,10	0,02	1,03	1,15
	Na ₂ O	%	0,07	0,00	0,07	0,07
	SO ₃	%	3,25	0,06	3,04	3,38
	Resíduo Insolúvel	%	13,09	0,83	11,17	14,64
	CO ₂	%	2,43	0,21	1,96	2,55

O PSA utilizado foi o “BASF VP PWS 125-250”, tem granulometria compreendida entre 60 e 400 μ m, sendo que 80% das partículas tem tamanho entre 98 e 235 μ m (Figura 17). A capacidade de absorção do polímero é de aproximadamente 40g de água potável para 1g de polímero⁹. O polímero é praticamente insolúvel em água, tem massa específica entre 600 e 700kg/m³, pH entre 6 e 8, e seu ponto de fusão é alcançado aos 280 °C. Apresenta-se como grãos sólidos, e não é considerado tóxico. Sua decomposição em altas temperaturas gera monóxido de carbono, dióxido de carbono, óxidos de nitrogênio e de sódio. A pesagem do polímero para preparo das pastas de cimento foi feita em balança com precisão de 0,0001g.

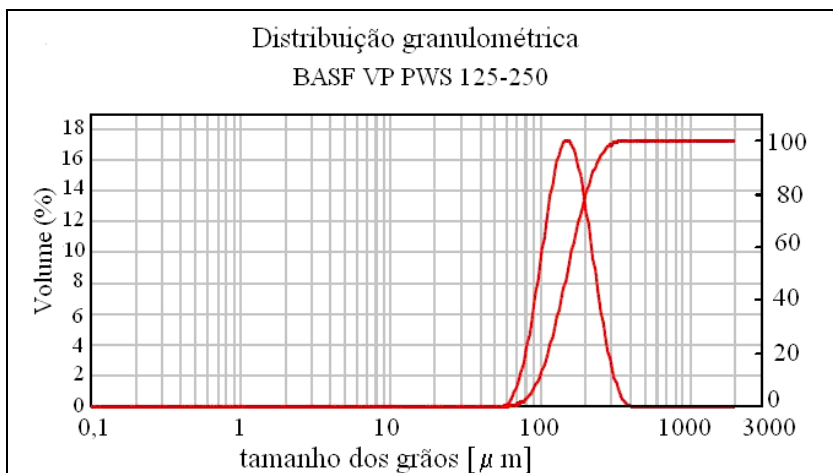


Figura 17 - Distribuição granulométrica do PSA utilizado neste trabalho.

Os teores de PSA foram calculados e estão expressos neste trabalho em porcentagem relativa à massa de cimento de cada mistura.

A água empregada no preparo das pastas de cimento foi fornecida pela rede pública de abastecimento de Florianópolis. Assim como os outros materiais, foi armazenada por pelo menos 24h no laboratório climatizado a uma temperatura de $24 \pm 4^\circ\text{C}$.

⁹ Em condições normais de temperatura e pressão, e pH da água próximo de neutro.

3.1.2 Determinação dos traços e procedimentos de mistura

O plano experimental baseia-se na relação água/cimento de 0,30. Este valor é inferior aos 0,42 designados por Powers como menor relação água/cimento a partir do qual não haveria retração. Para tal relação, de acordo com a (Eq. 17), a cura interna com água incorporada necessita de uma relação água/cimento 0,054.

$$\left(\frac{a}{c}\right)_i = 0,18 \cdot \left(\frac{a}{c}\right), \text{ para } \left(\frac{a}{c}\right) \leq 0,36 \quad (\text{Eq. 19})$$

$$\left(\frac{a}{c}\right)_i = 0,18 \cdot (0,30)$$

$$\left(\frac{a}{c}\right)_i = 0,054$$

Sendo assim, a relação água/cimento total seria de $(0,300+0,054)=0,354$. Neste trabalho esta relação é referenciada sem o último dígito, embora este tenha sido considerado em todos os cálculos.

Dado o exposto, foram admitidas três relações água/cimento a título de referência:

0,30 → relação escolhida para ser submetida à cura interna;

0,35 → relação composta pela soma de 0,30 com 0,354;

0,42 → relação para a qual não haveria retração autógena.

O teor de PSA utilizado para cura interna parte do teor médio de polímero que pode ser saturado com a relação água/cimento 0,054. A capacidade de absorção de 40g (de água/ 1g de polímero) demandaria a quantidade de 0,135% de polímero em relação à massa de cimento. Por exemplo, para preparo de uma mistura com 1kg de cimento, com relação água/cimento de 0,30, submetida à cura interna seriam necessários:

$$(0,30) \times (1000 \text{ g}) = 300 \text{ g de água para amassamento};$$

$$(0,054) \times (1000 \text{ g}) = 54 \text{ g de água para cura interna};$$

$$\frac{(54 \text{ g})}{(40 \text{ g})} = 1,35 \text{ g de PSA para cura interna, que correspondem a } 0,135\% \text{ com relação à massa de cimento (referenciado neste trabalho como } 0,14\%).$$

Os resultados da adição de 0,14% não foram tão bons quanto esperados no que concerne ao combate à retração autógena. Por isto, um teor 100% maior (0,270%, aqui referenciado como 0,27%) e um terceiro teor (determinado após a observação dos resultados obtidos com os dois

primeiros) foram testados, almejando a neutralização da retração. O terceiro teor testado foi de 0,203%, referenciado neste trabalho como 0,20%.

Os procedimentos de mistura das pastas de cimento com PSA foram também de 3 tipos, nominados neste trabalho como *seco* (SEC), *úmido* (UM) e *saturado* (SAT). O modo de adição SEC consiste na dispersão prévia do polímero seco no cimento seco, antes da preparação da pasta. Toda a água necessária para a mistura (água de amassamento e água destinada à cura interna) é adicionada num mesmo momento. No modo UM o PSA é hidratado com a porção de água destinada à cura interna, e posteriormente o gel formado é adicionado à pasta de cimento preparada com a água de amassamento. O terceiro modo, utilizado na grande maioria dos estudos até então publicados, consta da dispersão do polímero seco em toda a água necessária para a mistura (água de amassamento e água destinada à cura interna) antes da adição de cimento. No modo SAT o PSA é misturado a uma quantidade de água muito superior àquela necessária para sua saturação. No momento de adição do PSA esta água ainda não recebeu o cimento, e, portanto não apresenta pH elevado, nem altas concentrações iônicas. Nesta situação o polímero pode absorver tanta água quanto suas cadeias poliméricas suportarem, remanesecendo menor volume de água para amassamento.

As rotinas de preparo das pastas são, portanto, distintas em função do modo de adição do PSA. A seguir, são detalhados cada um dos três procedimentos.

Procedimento de mistura com polímero adicionado seco (misturas denominadas SEC) (Figura 18):

- dispersão do PSA seco no cimento seco. Homogeneização durante 5 minutos em recipiente plástico com ajuda de espátula.;
- colocação de toda a água (água de amassamento e água destinada à cura interna) na cuba da argamassadeira;
- com a argamassadeira ligada em velocidade I, adição do cimento com polímero à água ao longo de 2min.;
- parada por 30s para raspagem com espátula das laterais e fundo da cuba, bem como da pá, de modo a melhor homogeneizar a mistura;
- retomada da mistura em velocidade II por 1min;
- parada por 30s para nova raspagem das laterais, fundo da cuba e pá;
- finalização da mistura em velocidade II por 1min.

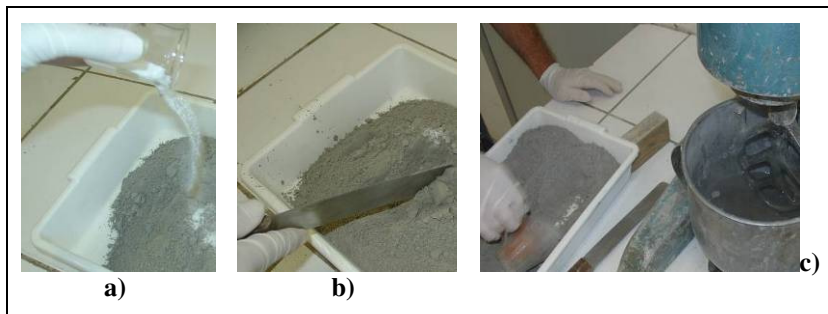


Figura 18 - Preparo de mistura com PSA adicionado no modo seco (misturas denominadas SEC). Em a) a adição do PSA ao cimento, sem qualquer adição de água. Em b) a homogeneização dos materiais ainda secos no recipiente plástico com ajuda de espátula. Em c) o material seco sendo adicionado a toda a água (água de amassamento e água destinada à cura interna).

Na Figura 19 é apresentado um esquema simplificado do procedimento de mistura com polímero adicionado seco.

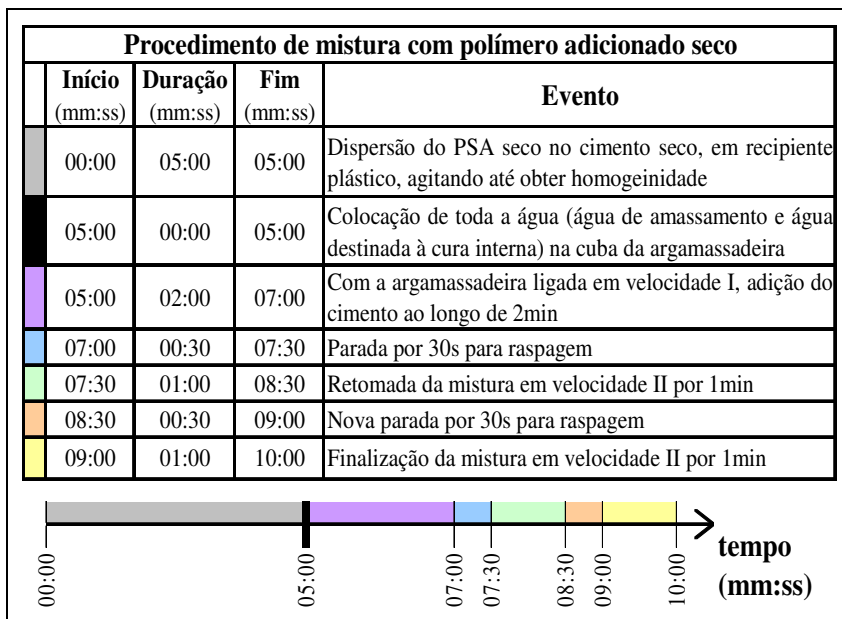


Figura 19 – Descrição do procedimento de mistura com polímero adicionado seco (misturas denominadas SEC). Os eventos estão relacionados às cores que compõem a linha do tempo esquematizada.

Procedimento de mistura com polímero adicionado úmido (misturas denominadas UM) (Figura 20):

- hidratação prévia do PSA com a água destinada à cura interna, em béquer. Homogeneização do gel com bastão de vidro. Vedação do béquer com vidro de relógio lacrado com fita adesiva, de modo a evitar a perda de água para a atmosfera. Repouso do gel por no mínimo 15min, para que possíveis grumos remanescentes de PSA anidro sejam hidratados;
- colocação da água de amassamento na cuba da argamassadeira;
- com a argamassadeira ligada em velocidade I, adição do cimento ao longo de 2min;
- parada por 1min para raspagem com espátula das laterais e fundo da cuba, bem como da pá, e adição do gel de PSA;
- retomada da mistura em velocidade I por 1min;
- parada por 30s para nova raspagem das laterais, fundo da cuba e pá;
- finalização da mistura em velocidade II por 1min.

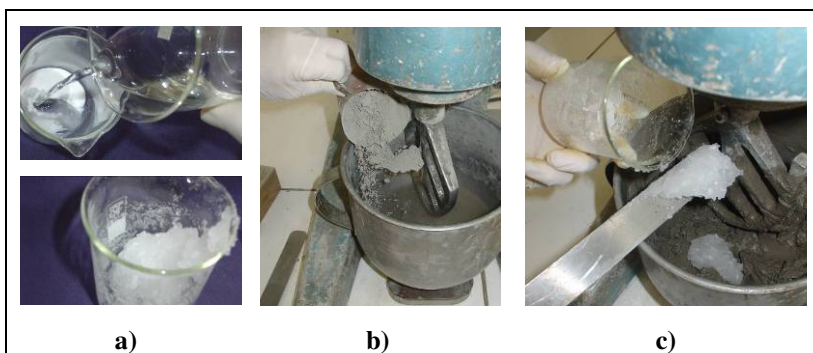


Figura 20 - Preparo de mistura com PSA adicionado no modo ÚMIDO. Em a) a água destinada à cura interna é misturada ao PSA e reservado b) o cimento e a água de amassamento são misturados e homogeneizados. Em c) a mistura reservada de PSA e de água destinada à cura interna é adicionada à pasta de cimento e novamente homogeneizada.

Na Figura 21 é apresentado um esquema simplificado do procedimento de mistura com polímero adicionado úmido.

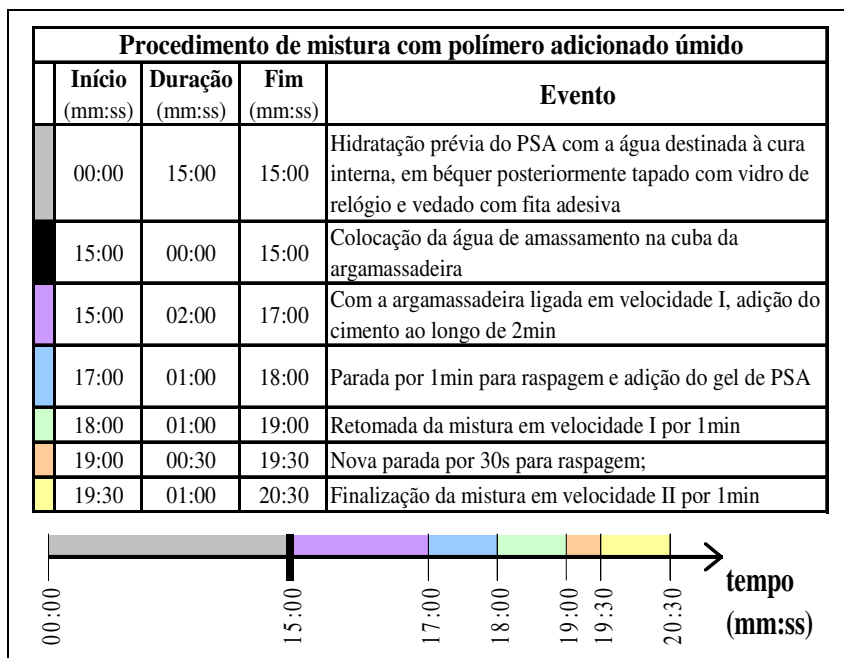


Figura 21 – Descrição do procedimento de mistura com polímero adicionado úmido (misturas denominadas UM). Os eventos estão relacionados às cores que compõem a linha do tempo esquematizada.

Procedimento de mistura com polímero saturado (misturas denominadas SAT) (Figura 23):

- colocação de toda a água (água de amassamento e água destinada à cura interna) na cuba da argamassadeira;
- adição do PSA seco durante 30s;
- com a argamassadeira ligada em velocidade I, adição do cimento ao longo de 2min;
- parada por 30s para raspagem com espátula das laterais e fundo da cuba, bem como da pá, de modo a melhor homogeneizar a mistura;
- retomada da mistura em velocidade II por 1min;
- parada por 30s para nova raspagem das laterais, fundo da cuba e pá;
- finalização da mistura em velocidade II por 1min.

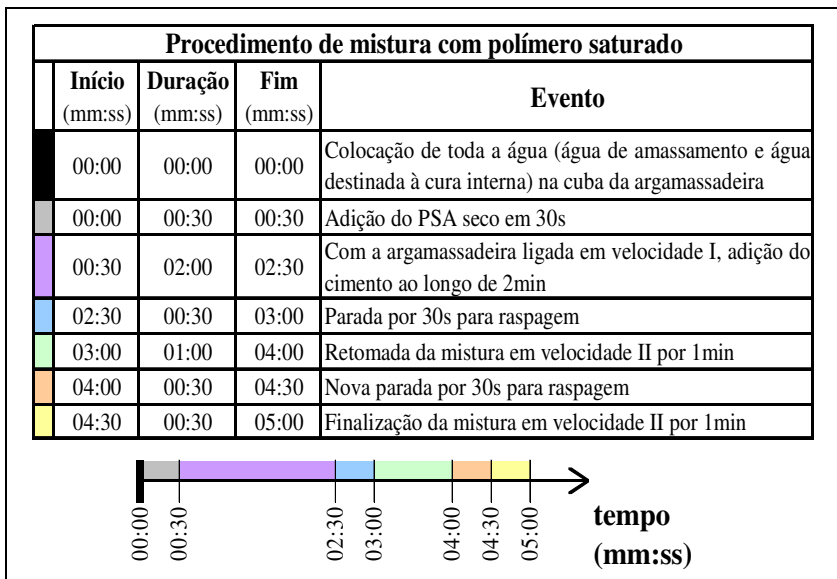


Figura 22 – Descrição do procedimento de mistura com polímero adicionado saturado (misturas denominadas SAT). Os eventos estão relacionados às cores que compõem a linha do tempo esquematizada.

Na Figura 22 é apresentado um esquema simplificado do procedimento de mistura com polímero adicionado úmido.

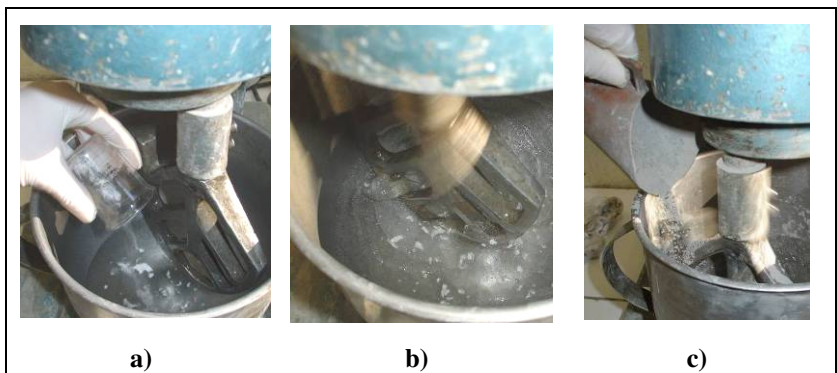


Figura 23 - Preparo de mistura com PSA adicionado no modo SATURADO. Em a) a mistura do PSA com toda a água (de amassamento e destinada à cura interna). Em b) homogeneização da água com PSA para desfazer os grumos de polímero que eventualmente se formem. Em c) a adição do cimento.

Para todas as misturas preparadas nesta pesquisa, os insumos foram mantidos em sala climatizada por pelo menos 24 horas antes de serem utilizados. Nesta mesma sala, com temperatura de 24 ± 4 °C e umidade relativa de 75 ± 5 %, foram realizados os ensaios nas misturas frescas, bem como as moldagens dos corpos-de-prova submetidos a todos os outros ensaios relatados nesta dissertação.

Os traços estudados foram 12. Três deles sem PSA (misturas tidas como referências) e nove sendo variações de teor de PSA (3 teores testados) versus modo de adição de PSA (3 modos testados). O Quadro 2 contém informações sobre as misturas, como quantidade de água para amassamento e cura interna, teor de PSA e modo de adição do mesmo.

Nome da mistura	Relação água/cimento para amassamento	Relação água/cimento para cura interna	PSA (% em relação à massa de cimento)	Modo de adição do PSA
R30	0,300	-	-	-
R35	0,354			
R42	0,420			
0,14-SEC	0,300	0,054	0,135	seco
0,14-UM	0,300	0,054	0,135	úmido
0,14-SAT	0,300	0,054	0,135	saturado
0,20-SEC	0,300	0,054	0,203	seco
0,20-UM	0,300	0,054	0,203	úmido
0,20-SAT	0,300	0,054	0,203	saturado
0,27-SEC	0,300	0,054	0,270	seco
0,27-UM	0,300	0,054	0,270	úmido
0,27-SAT	0,300	0,054	0,270	saturado

Quadro 2 - Nomeclatura e composição das misturas estudadas

3.2 Metodologia de ensaios

3.2.1 Fluidiez, exsudação e segregação das pastas de cimento

Um ensaio com mesa de abatimento foi utilizado na avaliação da consistência das pastas de cimento no estado fresco. Basicamente o ensaio realizado neste estudo baseou-se na NBR 13276 (2005), salvas algumas alterações. O cone utilizado para moldagem do tronco cônico tem diâmetro da base igual a 10,15cm, diâmetro de topo igual a 7,00cm e altura de 5,00 cm . Após o preenchimento do cone com a pasta de cimento, este é retirado. São feitas então as duas primeiras medidas de

diâmetro de espalhamento da pasta na mesa (denominado Flow 0). As medidas são tomadas perpendicularmente uma à outra. São aplicados 10 golpes em 10 segundos, e novamente medidos os diâmetros de espalhamento (Flow 10). Aplicam-se mais 10 golpes em 10 segundos, medindo-se os diâmetros de espalhamento (Flow 20). Como valor final de espalhamento para cada número de golpes, adota-se a média das duas medidas ortogonais. Este método de ensaio é o mesmo adotado por Weidman et al. (2006). Pelo mesmo ensaio é possível verificar fenômenos como exsudação e segregação.

3.2.2 Massa específica das pastas de cimento

Este ensaio seguiu parcialmente a NBR 13278 (1995). A principal modificação do ensaio sugerido pela norma foi o adensamento final da mistura no recipiente. Ao invés de golpear o molde lateralmente com o soquete após o preenchimento, deixava-se o recipiente cair por três vezes de uma altura de aproximadamente 3cm, completando o adensamento. Vale ressaltar que foi utilizado um recipiente de metal, e de volume diferente do recomendado pela referida norma (Figura 24).



Figura 24 - Realização do ensaio de massa específica. Em a) preenchimento do recipiente. Em b) pasta sendo adensada com golpes de soquete.

3.2.3 Evolução da temperatura

O ensaio de evolução da temperatura foi utilizado na determinação do tempo zero (t_0), a partir do qual a retração autógena começaria a ser considerada. Foi admitido como t_0 aquele decorrente entre a adição de cimento à água e aquele em que a pasta de cimento mantida em calorímetro semi-adiabático, alcança o pico máximo na evolução de temperatura. Sabe-se que a temperatura máxima atingida, bem como o tempo necessário para que ela seja alcançada, são funções

do isolamento térmico proporcionado pelo calorímetro. O calorímetro semi-adiabático utilizado para determinação do t_0 de todas as misturas foi o mesmo utilizado por Souza (2007), e está descrito no ANEXO A.

O acompanhamento da evolução de temperatura foi baseado no que descreve Sousa (2007), tendo sido utilizados nesta pesquisa os mesmos equipamentos. O ensaio foi realizado em sala climatizada a 24 ± 4 °C, a evolução de temperatura das pastas foi monitorada com termopares do tipo K ligados a um sistema de aquisição de dados Agilent Technologies 34970A.

3.2.4 Retração autógena medida com transdutores de deslocamento

Este ensaio utilizou corpos de prova semelhantes aos descritos na norma norte-americana ASTM C 490 -04 (2004). Entretanto, nas extremidades utilizam-se parafusos, e não os pinos descritos nesta norma.

Para cada argamassa preparada foram moldados 2 corpos-de-prova prismáticos. A face superior dos moldes foi selada com fita adesiva plástica imediatamente após a moldagem, para evitar a troca de umidade com o ambiente ao longo dos 3 dias de ensaio. Durante este período os prismas permanecem moldados.

Nas extremidades da forma em que são moldados os prismas ficam dispostos dois parafusos metálicos alinhados com o eixo longitudinal. Um deles é rosqueado no furo que atravessa, sendo seu diâmetro e passo compatíveis com o furo. O outro, de diâmetro inferior ao do furo que atravessa, é fixado por porcas. As cabeças dos parafusos permanecem no interior da forma, de modo que estejam ancoradas com o endurecimento da pasta. A ponta externa de um dos parafusos fica em contato com um transdutor de deslocamento. Apenas um transdutor foi utilizado em contato com cada corpo-de-prova. A distância (interna) entre os pinos é medida, e considerada nos cálculos como a distância livre. Desde a moldagem até o momento em que se alcança o t_0 , o pino em contato com o transdutor de deslocamento permanece fixo pelas porcas.

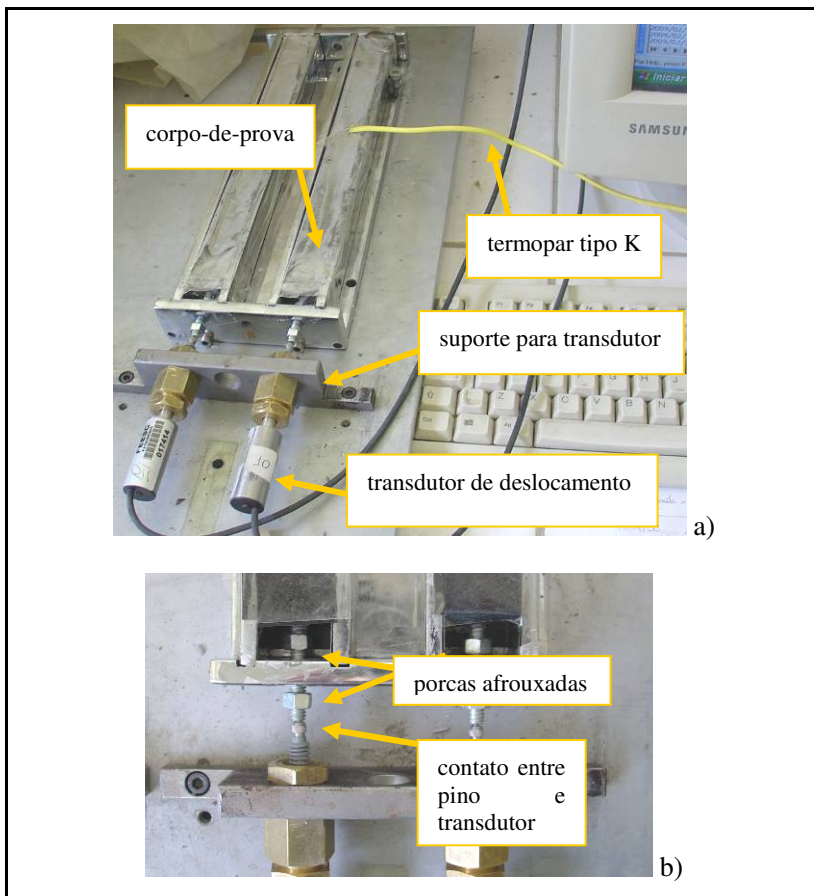


Figura 25 - Bancada de retração composta de moldes metálicos e transdutores de deslocamento. Em a) vista da bancada com amostra em ensaio. Em b) detalhe da porca já afrouxada , depois de alcançado o t_0 .

A fim de guardar espaço que permita afrouxar a porca alocada no interior da forma, é inserida uma barreira de contenção. Esta barreira não permite que a pasta de cimento escoe sobre a porca e endureça sobre ela. Depois de alcançado o t_0 a barreira é removida e estas porcas são afrouxadas, de modo a permitir os deslocamentos com a pasta de cimento. A extremidade do corpo-de-prova em contato com o transdutor é considerada livre, apesar do possível atrito entre o parafuso e o furo passante do molde. O pino inserido na outra extremidade do corpo-de-

prova permanece fixo ao longo de todo o ensaio, e não pode ser afrouxado após a moldagem.

Na Figura 26 pode ser visualizada uma representação gráfica da bancada de retração. Em a) a bancada logo após a moldagem de um prisma. Há o posicionamento de uma barreira flexível para contenção da pasta de cimento, resguardando o espaço reservado ao afrouxamento da porca. Após o t_0 , é removida a barreira flexível e as porcas são afrouxadas, conforme b). Isto torna possível a movimentação do parafuso em contato com o transdutor de deslocamento.

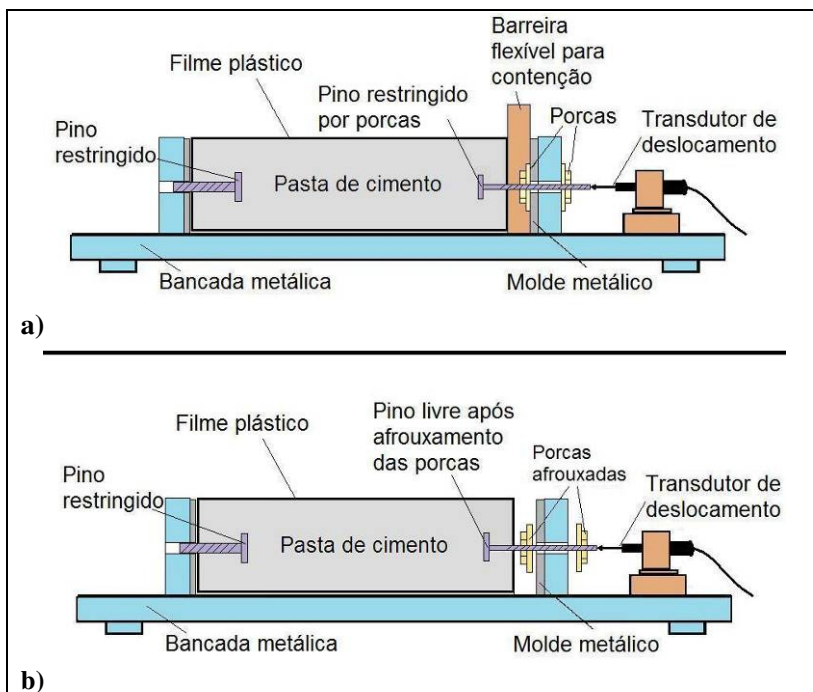


Figura 26 – Esquema da bancada de retração. Em a) a representação do corpo-de-prova desde a moldagem até que seja alcançado o t_0 . Em b) a representação do mesmo corpo-de-prova após o alcance do t_0 . Note-se a remoção da barreira de contenção e o afrouxamento das porcas para liberação do pino em contato com o transdutor de deslocamento.

Os corpos-de-prova e equipamentos que compõem a bancada de retração permaneceram em sala climatizada durante todo o período. As medidas de deformação foram tomadas de maneira automatizada, em

intervalos de 20 minutos, por sensores de deformação conectados a um aquisitor de dados.

A temperatura de um dos corpos-de-prova de cada mistura também foi monitorada. Para isto foi utilizado termopar do tipo K inserido na meia-altura da seção do prisma, ligado ao mesmo aquisitor de dados citado. Os momentos de leitura das temperaturas coincidem com os momentos de leitura dos sensores de deslocamento. Este parâmetro foi monitorado para que fosse possível descontar-se, da retração medida pelos transdutores de deslocamento, a deformação térmica. Foi admitido que a variação térmica fosse idêntica para ambos os prismas de cada mistura.

Para o cálculo da retração autógena foi utilizada a equação 19, subtraindo-se do resultado a deformação de origem térmica. O coeficiente de dilatação térmica adotado foi de $16 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

3.2.5 Retração autógena medida com relógio comparador

Este ensaio utiliza os corpos de prova descritos na norma norte-americana ASTM C 490 -04 (2004). Trata-se de corpos prismáticos, de dimensões 2,5 x 2,5 x 28,5 cm, com um pino metálico em cada uma das extremidades, axialmente centrados (Figura 27). A distância interna entre os pinos é chamada distância livre, e deve ser tomada antes da moldagem dos prismas.

Para cada traço estudado foram moldados 3 prismas. Após a moldagem as formas foram acondicionadas em sacos plásticos vedados com fita adesiva, e depositadas em câmara úmida por 24h. Passadas 24h após a moldagem os corpos de prova eram desmoldados e imediatamente envolvidos em filme plástico e posteriormente em filme de alumínio ou fita adesiva aluminizada. A utilização de filme plástico entre a superfície dos prismas e o material aluminizado visa reforçar a condição autógena, e impedir reações de expansão pelo contato do cimento com alumínio. A superfície do filme de alumínio por sua vez minimiza a troca de calor dos corpos de prova com o ambiente externo. O conjunto, em ideais condições de vedação, isola os prismas do ambiente externo, e impede a perda de umidade para o ambiente. Ao evitar a variação de temperatura, variação de massa, e a aplicação de forças externas sobre os prismas, foram criadas condições para que fossem consideradas autógenas as deformações lineares medidas com relógio comparador.

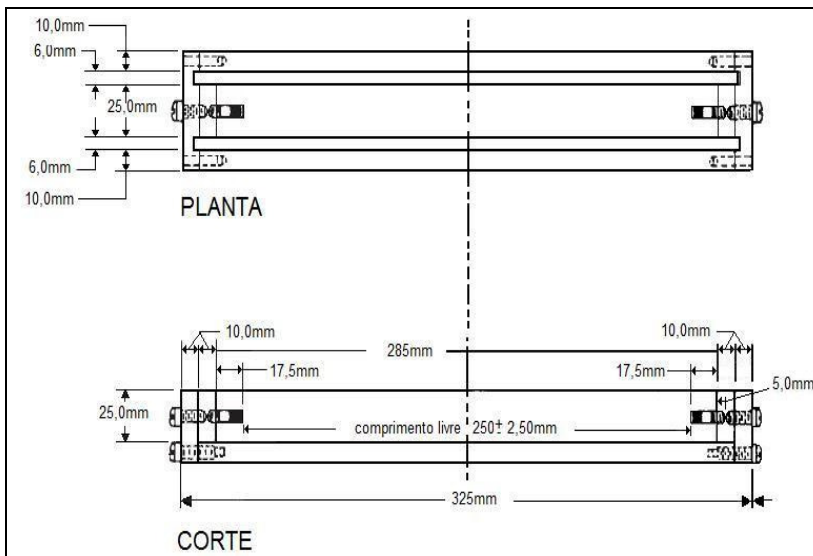


Figura 27 - Modelo de molde utilizado para preparo dos corpos de prova submetidos aos ensaios de retração com relógio comparador. Os corpos de prova prismáticos são baseados no descrito pela ASTM C 490 - 04 (2004). Para o ensaio de retração com transdutor de deslocamento o mesmo molde foi utilizado, no entanto com outros modelos de pinos

Por estes motivos, o procedimento descrito foi sempre realizado com muita cautela. Contudo, apesar de todos os cuidados, não foi possível evitar a variação de massa das amostras. Este problema acomete freqüentemente os pesquisadores. Foi arbitrada uma variação máxima de $\pm 1,00\%$ aos 28 dias, para que fossem aceitos os corpos de prova. Na literatura foram encontrados, entretanto, valores ainda menores de perda de massa chegando a corresponder a $0,03\%$ aos 28 dias (BALTHER, 2004) e menos de $0,0025\%$ ao dia (correspondendo a $0,07$ aos 28 dias) (GLEIZE et al., 2006).

Durante todo o período após o desmolde os prismas foram mantidos na sala climatizada onde aconteceram os ensaios de medida com relógio comparador. Esta sala possui umidade e temperatura controladas. Durante o tempo em que os prismas estiveram em ensaio foram registradas temperaturas máximas e mínimas de 24 e $17,7^{\circ}\text{C}$ respectivamente. A umidade relativa no interior da sala, por sua vez, teve máxima registrada de 48 e mínima de 33% .

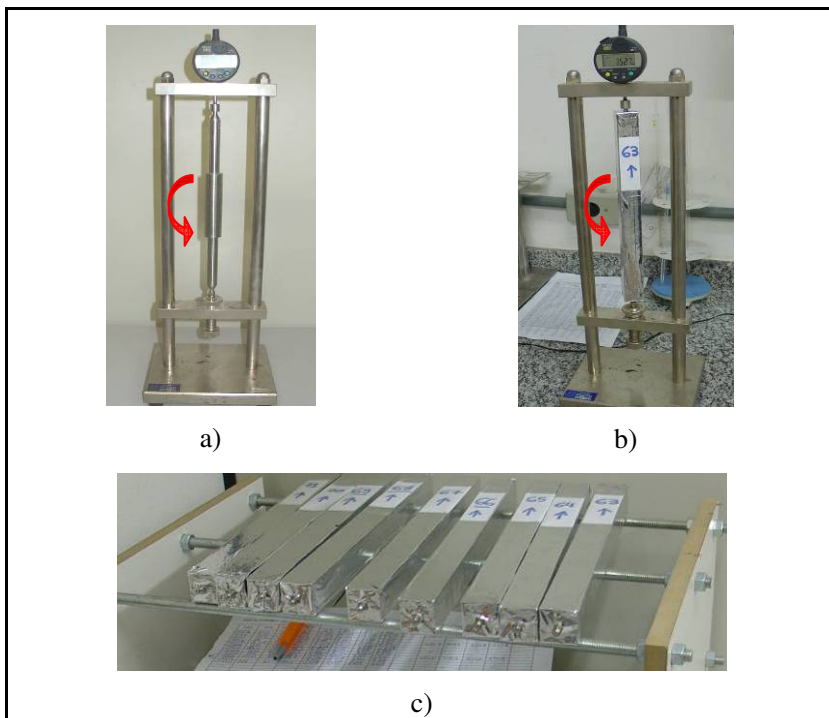


Figura 28 - Medidas de retração com corpos de prova prismáticos com base no procedimento proposto pela ASTM C 490 -04 (2004). Em a) calibração do relógio comparador com base na barra de referência. Em b) quadro de medição com corpo-de-prova posicionado para leitura. Em destaque a flecha indicativa da rotação do corpo sobre o próprio eixo e a seta indicando a extremidade do prisma que deve ser sempre orientada para cima durante as medições. Em c) corpos de prova em repouso sobre roletes, na posição em que permaneceram entre as medições.

A medição dos corpos de prova foi realizada até os 28 dias¹⁰. O método utilizado foi o proposto pela ASTM C 490 -04 (2004). Este consiste na medida do corpo-de-prova posicionado verticalmente, tendo um relógio medidor em contato com um dos pinos expostos. Foi utilizado relógio comparador da marca Mitutoyo, modelo Absolute com precisão de 0,001mm. A orientação de cada prisma, ao ser posicionado

¹⁰Todas as idades referenciadas neste estudo são contadas a partir do momento em que o cimento é adicionado à água.

no quadro de retração, foi mantida em todas as medições. Para isto foi demarcada, em cada corpo-de-prova, uma seta indicando a extremidade do corpo-de-prova que deveria estar voltada para o relógio comparador.

Antes da medição de qualquer corpo-de-prova procede-se com a calibração do quadro. Esta aferição é feita com uma barra metálica, cuja dimensão é conhecida. Ao posicionar a barra no quadro esta é rotacionada até que seja encontrada a menor leitura. Neste ponto o relógio é zerado, a calibragem está concluída, e pode-se posicionar o corpo-de-prova para tomar sua medida. Com o posicionamento do prisma no quadro de medição procede-se a rotação do corpo em seu eixo, de modo que as possíveis excentricidades do mesmo sejam menosprezadas no momento da medição. A menor medida registrada pelo relógio comparador é a leitura considerada. Após cada medição, os prismas foram pesados e recondicionados à posição horizontal sobre roletes.

Para calcular a variação de comprimento dos corpos de prova foi utilizada a Eq. 19:

$$L = \frac{L_{xi} - L_i}{G} \times 100 \quad (\text{Eq. 20})$$

Onde:

L_i = comprimento inicial do corpo-de-prova [mm]

L_{xi} = comprimento do corpo-de-prova medido em um dado tempo [mm]

G = distância interna livre entre os pinos [mm]

Como resultado da aplicação da Eq. 19 têm-se valores expressos em porcentagem. Todavia, é largamente difundida a unidade mm/mm x 10^{-6} , definida por Metha e Monteiro (1994) como microdeformação¹¹.

Embora o acompanhamento da retração tenha sido feito ao longo de 28 dias para cada mistura, as idades em que foram tomadas as medidas de cada prisma não coincidem com exatidão. Por isto, após plotar o gráfico microdeformações x idade, foi aplicada a linha de tendência que melhor se ajustasse aos pontos¹². Assim pôde-se utilizar a equação da linha de tendência para calcular os valores de retração em idades idênticas dos corpos de prova. As idades escolhidas para comparação entre as amostras foram 3, 7 e 28 dias. Com base nestes valores foi feita a análise estatística dos resultados.

¹¹ Tradução do termo em Inglês “microstrain”.

¹² Foi utilizado nesta etapa o software Microsoft Office Excel 2003.

Exemplos dos gráficos produzidos a partir dos dados coletados podem ser visualizados da Figura 39 até a Figura 50. Nestas mesmas figuras é possível verificar as equações matemáticas das regressões utilizadas para gerar as curvas ajustadas aos pontos. Note-se que, eventualmente, os gráficos contêm resultados de somente 2 corpos de prova. Para tais misturas o terceiro corpo-de-prova moldado apresentou resultados muito distantes dos outros dois, indicando possível quebra. Nestes casos, para viabilizar a análise estatística das amostras, foi arbitrado como resultado do corpo-de-prova excluído a média aritmética dos outros dois prismas.

3.2.6 Acompanhamento da variação da temperatura e UR no interior das pastas em ambiente termostatizado

O acompanhamento da evolução da temperatura e da umidade relativa (UR) interna das pastas foi feito com sensores da marca Vaissala, modelo HMP50. Estes equipamentos são capazes de medir umidades relativas de 0 até 98% e temperaturas entre -10 até +60 °C. O erro dos equipamentos é de $\pm 0,6$ °C e de $\pm 3\%$ para UR entre 0 e 90% e de $\pm 5\%$ para UR entre 90 e 98%.

Com a intenção de não danificar os sensores utilizados, o monitoramento foi feito sem que os mesmos entrassem em contato com as pastas de cimento. Imediatamente após o preparo das pastas, estas foram acondicionadas em tubos de ensaio de vidro, com diâmetro interno de 25mm. Na extremidade dos tubos foi inserida rolha de silicone com furo passante, através do qual o sensor foi embutido. Para isolar o sistema, todos os contatos entre tubo/rolha/sensor foram vedados com silicone. Desta forma, foi criada uma atmosfera interna de volume muito pequeno, de modo que a presença de ar foi desprezada na análise dos dados (Figura 29). Ao desprezar os efeitos desta atmosfera interna, admitiu-se que a UR estabelecida no espaço entre superfície da amostra e elementos de vedação do tubo seja igual à UR no interior da pasta de cimento.

Para cada mistura foram preenchidos e monitorados 2 tubos de ensaio. Após a moldagem os tubos foram armazenados em banho termostatizado, com água na temperatura de 22 ± 2 °C. Uma placa de isopor de 10cm de espessura foi utilizada como suporte para os tubos, ao mesmo tempo em que reforçava o isolamento térmico.

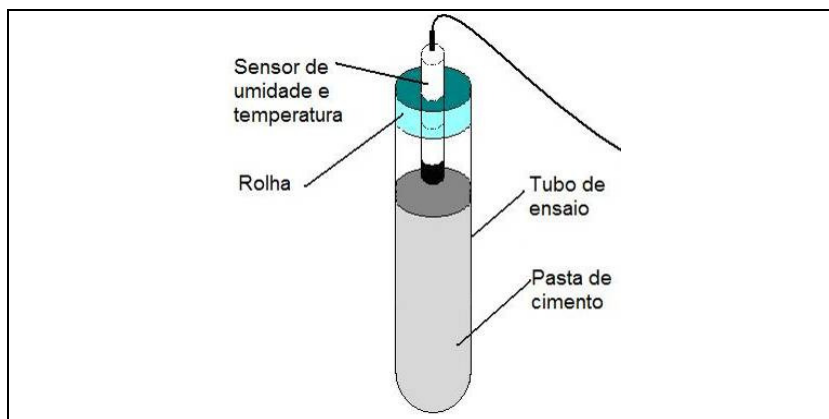


Figura 29 – Esquema do tubo de ensaio com amostra submetida ao monitoramento de UR e temperatura em banho termostatzado. Através de um furo passante na rolha de vedação do tubo, é possível inserir o sensor de umidade e temperatura de maneira que o sistema fique isolado do contato com a atmosfera.

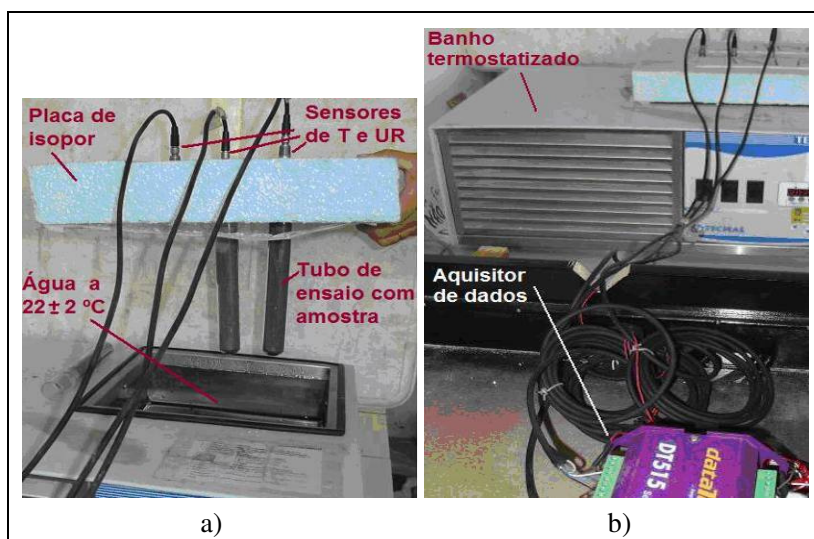


Figura 30 – Preparação de amostras submetidas a monitoramento de temperatura e UR. Em a) encaixe dos tubos de ensaio no suporte de isopor. Em b) monitoramento com os tubos de ensaio já imersos no banho termostatzado. Detalhe dos sensores ligados ao aquisitor de dados.

Os sensores, assim como os equipamentos utilizados na bancada de retração, estiveram conectados ao aquisitor de dados DataTaker DT550. As leituras de temperatura e UR foram feitas a cada 20 minutos, e os dados coletados através do programa DeLogger 4. O conjunto descrito pode ser visualizado na Figura 30.

Para todas as misturas, concomitantemente à tomada de temperatura das amostras em tubo de ensaio, foi também monitorada a temperatura de um dos prismas selados e submetidos ao ensaio de retração na bancada. No caso do prisma, o monitoramento foi feito com termopar tipo K instalado na altura média da seção do corpo-de-prova. A medida de temperatura dos prismas possibilitou estimar a retração térmica ocorrida nas amostras, e descontá-la da retração medida pela bancada.

3.2.7 Resistência à Compressão

Os ensaios de resistência à compressão das pastas de cimento foram realizados com base na Norma Brasileira NBR- 7215 (1996), com algumas divergências. Foram moldados ao todo 7 corpos de prova de cada mistura. A contar da data de moldagem, os corpos de prova foram aos 3, 7 e 28 dias. Aos 3 e 7 dias foram ensaiados dois elementos de cada mistura, e aos 28 dias 3 elementos.

O procedimento de moldagem ocorreu sempre em sala climatizada a 24 ± 4 °C. Imediatamente após o preenchimento dos moldes, estes foram tapados com placas de vidro e levados para câmara úmida, onde permaneceram por 24h. Findadas as 24h procedeu-se com a desmoldagem dos elementos e identificação.

Cada grupo de elementos pertencentes à mesma mistura foi embalado e vedado em saco plástico com fita adesiva. Os sacos contendo os corpos-de-prova foram então armazenados em uma caixa de isopor, mantida na sala climatizada. O intuito desta prática foi de manter os espécimes em condições autógenas.

Na data de cada ensaio à compressão os corpos de prova a serem rompidos foram medidos com paquímetro digital e retificados com disco diamantado. Este procedimento requer que os corpos-de-prova entrem em contato com a água, e por este motivo a retificação ocorreu somente algumas horas antes de cada rompimento. O equipamento utilizado para ensaiar os elementos à compressão foi uma prensa Shimadzu. A resistência à compressão admitida foi a média, e para facilitar a interpretação dos resultados, estes foram plotados por idades.

3.2.8 Módulo de Elasticidade

O módulo de elasticidade é uma característica fundamental dos materiais cimentícios. Esta propriedade está relacionada à capacidade de deformação sob ação de tensões provenientes de carregamento, de ações térmicas e mesmo do fenômeno da retração. A sua importância, para os materiais à base de cimento, está na sua relação com o fenômeno de fissuração do material. Para que não haja fissuração, espera-se uma combinação favorável de certas condições como: retração mínima, resistência à tração e deformabilidade adequada em cada idade. Segundo Metha e Monteiro (1994), quanto menor o módulo de elasticidade, menor a tensão de tração elástica induzida para uma dada magnitude de retração. Assim, o módulo de elasticidade é (junto com a deformação por retração e resistência à tração) mais um fator que pode induzir à fissuração.



Figura 31 – Aparato utilizado para realização de ensaio de módulo de elasticidade em corpo-de-prova cilíndrico, 5 x 10 cm, de pasta de cimento.

No Brasil não há normalização para ensaios de módulo de elasticidade em corpos-de-prova cilíndricos em pasta submetidos à compressão axial. Porém, há uma norma para determinação desta propriedade em concreto, a NBR 8522 (2003). O método de ensaio utilizado neste trabalho toma esta norma como base, e por ele foram determinados os módulos de elasticidade (Figura 31). Para cada mistura,

o ensaio foi realizado em 3 corpos-de-prova, sempre aos 28 dias de idade¹³.

A NBR 8522:2003 recomenda que sejam realizados três ciclos de carregamento até a tensão maior (σ_b) e descarregamento até a tensão básica (σ_a) antes de realizar as leituras definitivas de deformação para o cálculo de módulo de elasticidade. O carregamento deve ser aplicado a uma velocidade que conduza a uma deformação específica constante de $(10 \pm 2) \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ou a uma tensão constante de $(0,25 \pm 0,05) \text{ MPa/s}$ até que seja alcançada uma tensão de aproximadamente 40% da resistência à compressão do material (σ_b). No entanto, estes ciclos de pré-carregamento não foram realizados.

O aparato utilizado para monitoramento das deformações ao longo do carregamento pode ser visualizado na Figura 31. Ele é composto por dois suportes metálicos presos, por 3 parafusos cada, ao corpo-de-prova. Em um dos suportes são fixados dois relógios comparadores com resolução de $1 \pm 0,001 \text{ mm}$. Um operador controla a aplicação de carga e outros dois operadores realizam as leituras de deformação quando requisitado. Com os resultados plotados em um gráfico de tensão x deformação, pode-se determinar o módulo de deformação de cada espécime. Neste trabalho, foi utilizada a função *Atingir Meta*¹⁴ do Software Microsoft Office Excel para determinar o módulo de deformação.

¹³ Os mesmos corpos-de-prova foram posteriormente ensaiados à compressão.

¹⁴ *Atingir Meta* faz parte do conjunto de comandos algumas vezes chamado de ferramentas de análise hipotética do programa Microsoft Excel. Quando se conhece o resultado desejado de uma fórmula única, mas não se conhece o valor de entrada que a fórmula precisa para determinar o resultado, utiliza-se a ferramenta *Atingir Meta*. Enquanto está atingindo a meta, o Microsoft Excel varia o valor em uma célula específica até que uma fórmula dependente daquela célula retorne o resultado desejado.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos experimentos realizados.

4.1.1 Fluidez, exsudação e segregação das pastas de cimento

A Figura 32 contém os resultados de espalhamento de cada uma das misturas (Flow 0, Flow 10 e Flow 20). Todas as misturas foram feitas no mesmo dia e em nenhuma delas pôde-se perceber exsudação ou segregação durante os ensaios.

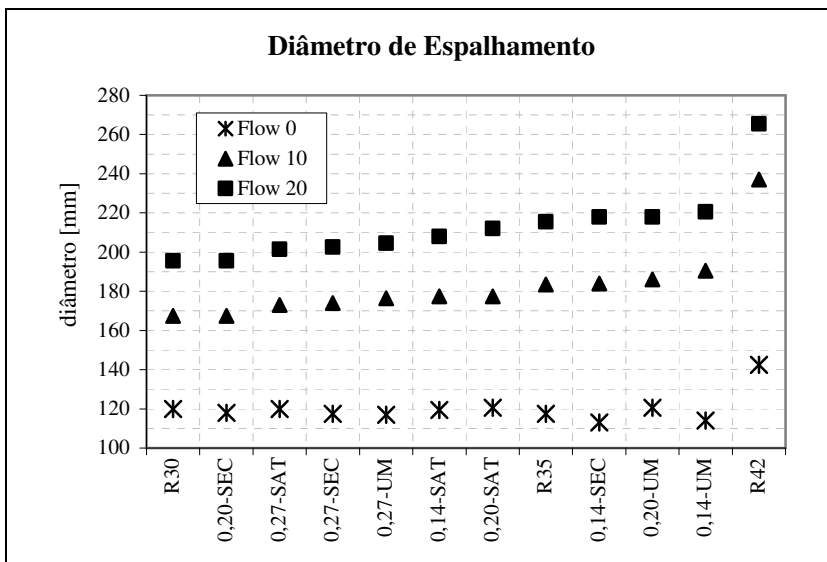


Figura 32 - Diâmetro médio de espalhamento das pastas de cimento antes das aplicações de golpes na mesa (Flow 0), após aplicação de 10 golpes (Flow 10) e após aplicação de mais 10 golpes (Flow 20).

No que refere-se aos resultados de Flow 0, conforme esperado, a mistura R42 teve maior espalhamento médio. Antagonicamente, as misturas R30 e R35 tiveram resultados contrários ao esperado. Normalmente, a maior relação água/cimento levaria a um maior diâmetro de espalhamento. Esperava-se também que, para as misturas contendo PSA, fosse válida a proporção inversa entre teor de PSA e diâmetro médio de espalhamento. Isto porque a menor quantidade de PSA captaria menor quantidade de água, restando maior volume de água livre para proporcionar fluidez à mistura. Entretanto, indo novamente de

encontro às expectativas, as pastas 0,14-SEC e 0,14-UM apresentaram os menores espalhamentos. As misturas 0,27-SEC e 0,27-UM obtiveram resultados praticamente iguais ao da mistura de referência R35.

É importante citar que com 0 golpes o diâmetro do tronco de cone tem grande parcela de erro. Este erro está vinculado ao manuseio do molde pelo operador, que por mais que procure retirá-lo ortogonalmente para não induzir deformações diametraais, muitas vezes não consegue evitá-las. Desta forma, a medida de Flow 0 não representa a tendência de comportamento das pastas quanto à fluidez.

Com 10 golpes (Flow 10) as misturas apresentaram tendências diferentes de espalhamento. Neste momento, os efeitos embutidos pelo operador na deformação do tronco de cone ao retirar o molde já estão parcialmente dissipados pela ação dos golpes. Pode-se então observar uma ordenação de diâmetros que se repete identicamente quando as misturas são novamente submetidas a mais 10 golpes (Flow 20).

A Figura 33 permite melhor visualização dos efeitos dos teores de polímero e dos modos de adição do mesmo na fluidez das pastas de cimento ensaiadas. Todas as misturas denominadas SAT apresentaram diâmetro de espalhamento, com 10 ou 20 golpes, inferiores aos da mistura R35. Isto pode ser resultado da maior captação de água pelo PSA, que é possibilitada por este modo de adição. Ao absorver maior volume de água, o PSA assume um papel de redutor do teor efetivo de água de amassamento, diminuindo a fluidez. Ainda com 10 ou 20 golpes, todas as misturas com 0,14% de PSA tiveram maior espalhamento que as misturas com 0,27% de PSA, indicando que o aumento do teor de polímero diminui a fluidez.

O modo de adição aparentemente não afetou o espalhamento das misturas contendo 0,27% de PSA, sendo que os valores praticamente se sobrepõem para quaisquer números de golpes.

Todas as misturas com PSA apresentaram espalhamentos (Flow 10 e Flow 20) superiores ao da mistura R30; o que leva a supor que: a) parte da água adicionada para cura interna não tenha sido absorvida pelo PSA ou, b) a água adicionada para cura interna tenha sido absorvida pelo PSA e liberada já nos primeiros instantes após a mistura ou; c) as partículas de PSA hidratado exerçam um efeito de rolamento que favoreça a movimentação dos grãos de cimento. Este fato ocorreu inclusive com as misturas de maior teor de PSA (0,27%). Por terem maior teor de polímero, esperava-se que estas misturas captassem maior quantidade de água do que somente aquela prevista como água para cura interna.

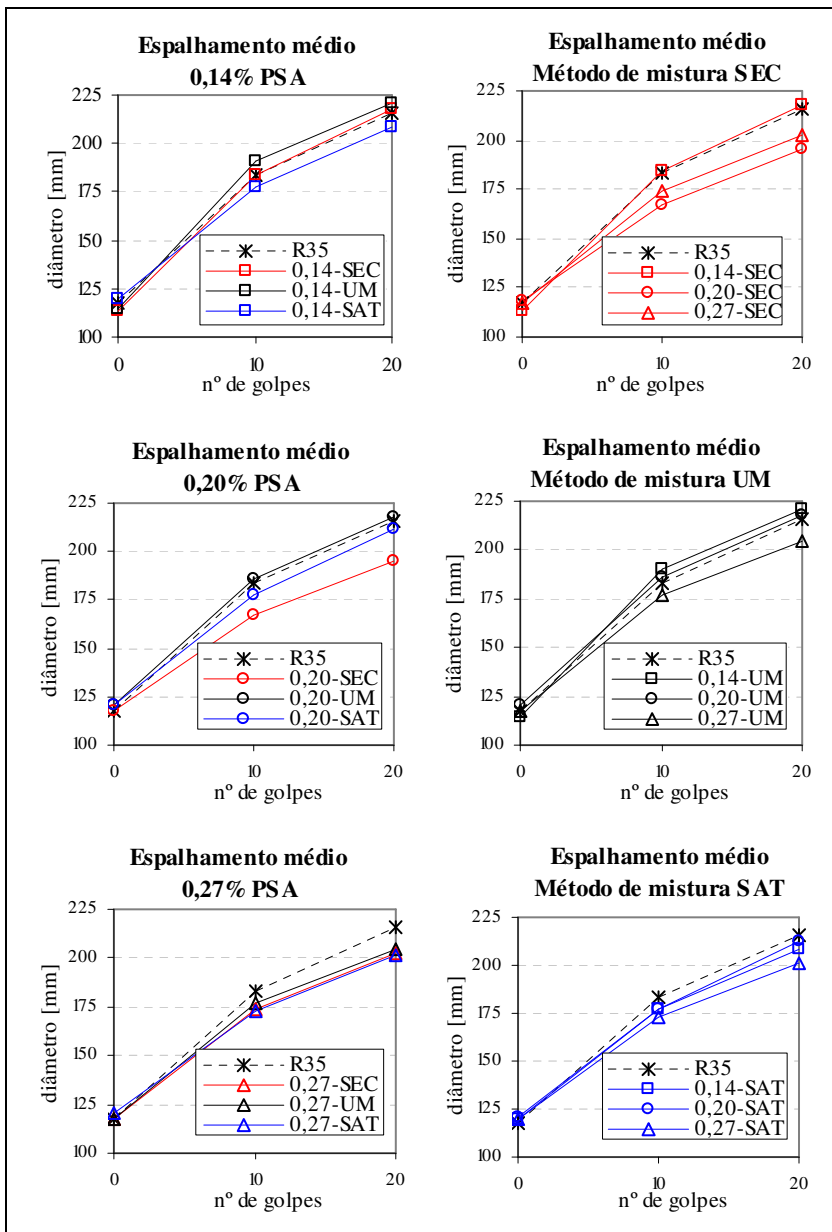


Figura 33 - Efeito do teor de polímero e modo de adição na fluidez. Todas as misturas têm mesma relação a/c total.

Não foi possível monitorar o comportamento da água potável absorvida pelo polímero quando da alteração brusca de pH do ambiente, a exemplo do que ocorre quando se inicia a hidratação do cimento. Também não foi possível verificar se acontece o equilíbrio de pH da água absorvida e da água de hidratação do cimento. E, se tal equilíbrio ocorre, não se pode prever com qual velocidade.

4.1.2 Massa específica das pastas de cimento

Todas as misturas com PSA tiveram menor massa específica que a mistura R35, e em geral maiores teores de PSA resultaram em pastas com menores massas específicas. A maior redução na massa específica a partir da adição de PSA foi de 2,65% e ocorreu para a mistura 0,27-SAT. Os resultados do ensaio estão expostos na Tabela 3 e na Figura 34.

Tabela 3 - Massa específica, variação da massa específica em função da adição do polímero e teor de ar incorporado das pastas de cimento testadas.

Mistura	Massa específica [g/cm ³]	Queda na massa específica pela adição de polímero [%]	Teor de ar incorporado [%]
R42	1,871	-	0,307
0,27-SAT	1,910	-2,649	2,460
0,27-SEC	1,913	-2,502	2,313
0,20-SEC	1,920	-2,115	2,028
0,20-SAT	1,926	-1,811	1,621
0,20-UM	1,927	-1,759	1,569
0,27-UM	1,935	-1,371	1,181
0,14-SEC	1,946	-0,785	0,793
0,14-SAT	1,953	-0,461	0,469
0,14-UM	1,960	-0,084	0,092
R35	1,962	-	0,210
R30	2,010	-	1,543

A massa específica do polímero utilizado está entre 600 e 700g/cm³. Para efeitos de cálculo do teor de ar incorporado foi adotado o valor médio de 650kg/m³.

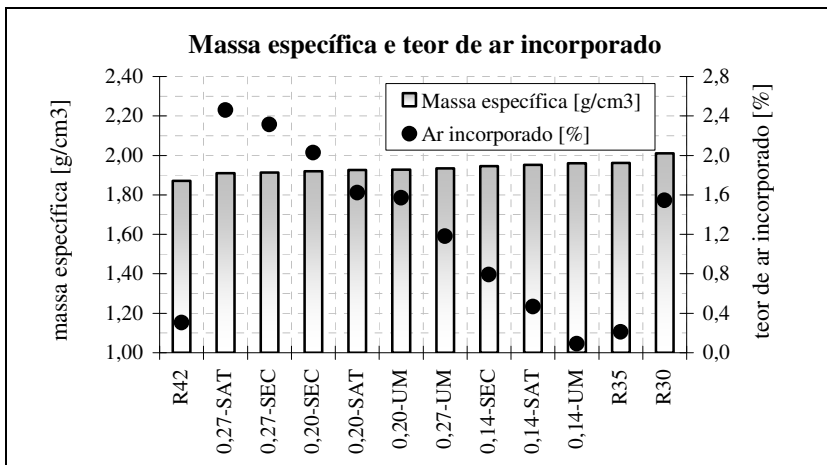


Figura 34 - Massa específica das pastas de cimento.

4.1.3 Evolução da temperatura

Os resultados coletados foram avaliados no software Microsoft Office Excel 2003. Gerando gráficos de temperatura x idade pode-se identificar o momento em que as misturas alcançam a temperatura máxima. O pico de temperatura da mistura R35 pode ser visualizado na Figura 35.

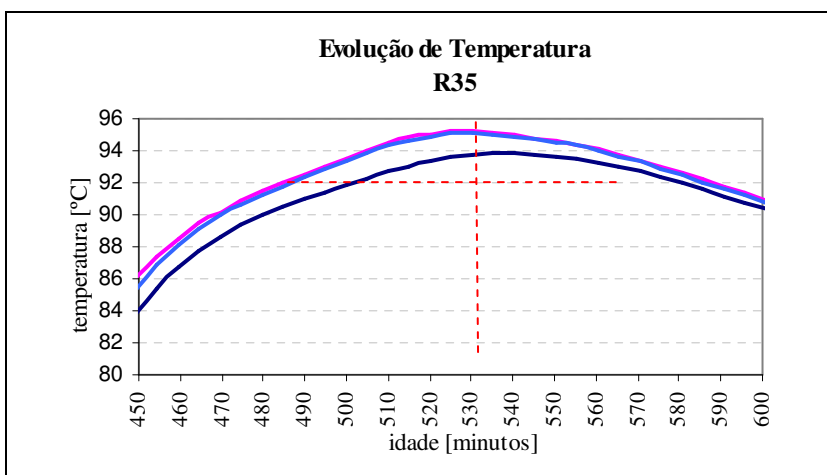


Figura 35 - Evolução de temperatura da mistura R35. O pico máximo de temperatura da amostra indica o momento considerado como t_0 da mistura.

O t_0 de cada mistura consta na Tabela 4. Pelos dados coletados verificou-se que as misturas contendo polímero tiveram maior t_0 e em geral tiveram menor pico máximo de temperatura (comparando-se com (R35)). O t_0 das misturas SAT foi inferior ao das misturas SEC.

Tabela 4 - Tempo zero (t_0) a partir do qual a retração autógena foi considerada e pico máximo de temperatura alcançada por cada mistura no calorímetro semi-adiabático descrito no ANEXO A.

Mistura	Tempo zero [horas]	Pico máximo de temperatura [°C]
R30	6,8	100
R35	8,8	95
0,14-SAT	9,4	95
0,27-SAT	9,4	91
0,14-UM	9,5	93
0,20-UM	9,7	93
0,20-SAT	9,9	91
0,27-SEC	10	89
0,20-SEC	10,1	89
0,27-UM	10,2	91,5
0,14-SEC	10,3	94
R42	10,5	87,5

Com base na Tabela 4 foi gerado o gráfico da Figura 36.

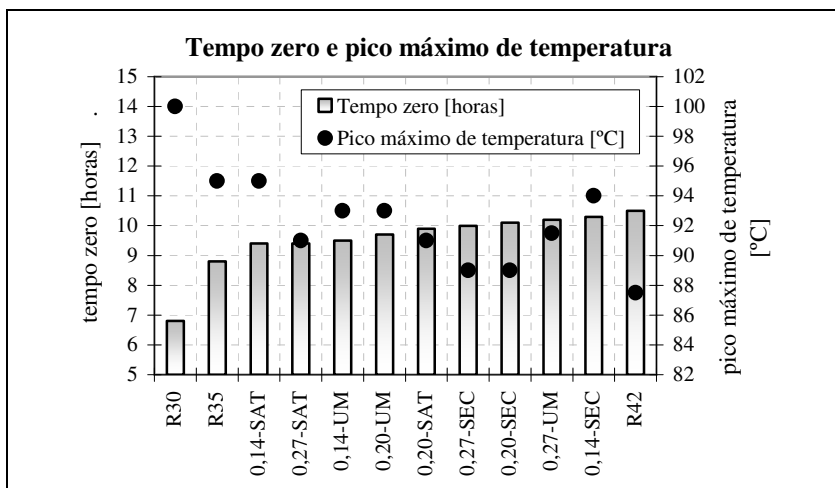


Figura 36 - Tempo zero e pico máximo de temperatura alcançada por cada mistura. Amostras mantidas em calorímetro semi-adiabático.

4.1.4 Retração autógena medida com transdutores de deslocamento

A Figura 37 contém os resultados de evolução da retração autógena nas pastas de cimento, para medidas realizadas com transdutores de deslocamento. Nestes resultados já está descontada a retração por variação térmica, conforme mencionado anteriormente.

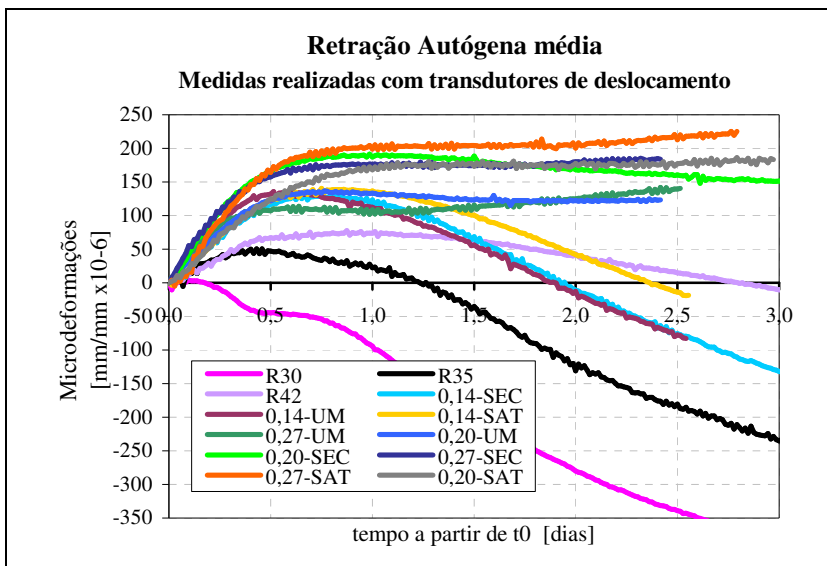


Figura 37 – Evolução da retração autógena das pastas de cimento. Medidas tomadas por transdutores de deslocamento.

Conforme consta na figura, a retração autógena foi, em maior ou menor escala, reduzida com a adição de PSA até a idade dos 3 dias quando utilizada mesma quantidade de água total. Até a referida idade somente as misturas contendo 0,14% de PSA apresentaram deformações negativas (o que indica encolhimento das amostras). Este resultado indica que a adição de 0,14% de PSA, em quaisquer dos métodos de adição utilizados, não foi o mais eficiente na eliminação da retração, muito embora tenha reduzido-a em pelo menos 44% (1,14-SEC e 0,14-UM) se comparada com a retração da pasta R35. Ainda, todas as misturas contendo 0,14% de PSA tendem a valores mais negativos com o passar do tempo, repetindo a tendência das misturas de referência. As demais misturas contendo PSA demonstraram eficiência no combate à retração autógena até os 3 dias de idade, apresentando tendência em manter o patamar de valores de expansão, ou mesmo tendência de

aumento da expansão. A mais eficiente delas foi pasta 0,27- SAT, com resultados positivos de até cerca de 240 microdeformações aos 3 dias.

A mistura R42 praticamente neutralizou da retração aos 3 dias. Entretanto, a curva gerada mostra a tendência de aumento da retração.

Os resultados obtidos não representam a otimização da cura interna com PSA, tendo em vista que a retração não foi neutralizada, mas sim um efeito de expansão foi obtido. Este efeito indica que os teores empregados superam o teor ótimo, que em tese proporcionaria valores de retração tendendo a zero. A expansão possivelmente deve-se a uma maior formação de etringita e monossulfatos durante a hidratação do cimento.

A evolução de temperatura de cada uma das misturas a partir do t_0 consta na Figura 38.

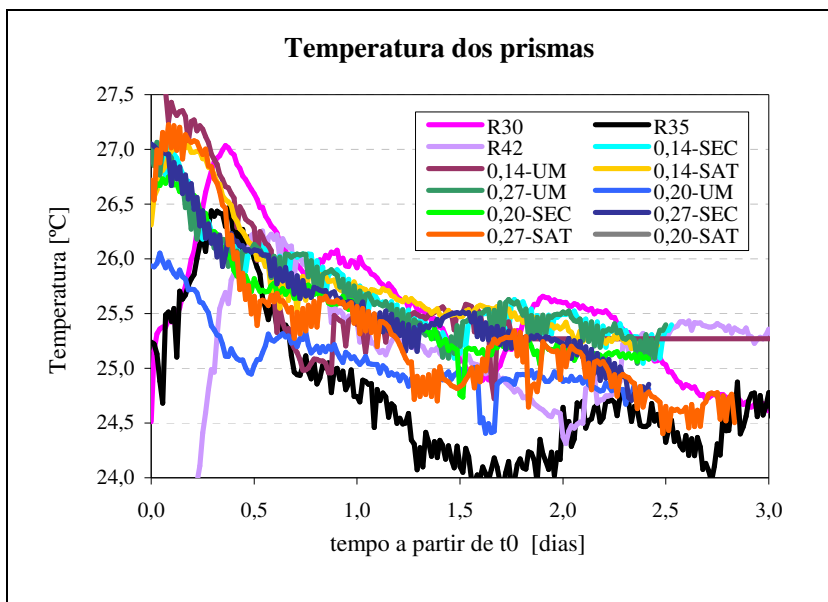


Figura 38 – Curvas de evolução de temperatura das pastas de cimento. Medidas tomadas a cada 20 minutos através de termopares do tipo K.

4.1.5 Retração autógena medida com relógio comparador

A variação de massa dos prismas foi regularmente medida em balança, com precisão de 0,01g, após cada medida com relógio comparador. A máxima variação de massa ocorreu aos 28 dias para um dos prismas da mistura 0,14-UM, e foi de -0,70%. A variação de massa está expressa em porcentagem relativa à primeira pesagem do corpo-de-prova, tomada imediatamente após a primeira medida com o relógio comparador. A Tabela 5 contém as variações máximas de massa ocorridas para os prismas de cada mistura. Valores negativos indicam perda de massa. Durante todo o período os prismas foram mantidos em sala climatizada, com UR e temperatura controladas. Durante o tempo em que os prismas estiveram em ensaio foram registradas temperaturas máximas e mínimas de 24 e 17,7°C respectivamente. A UR no interior da sala, por sua vez, teve máxima registrada de 48 e mínima de 33%.

Tabela 5 - Variação de massa dos corpos de prova submetidos ao ensaio de retração com relógio comparador. Variação aos 28 dias. Valores negativos indicam a perda de massa.

Mistura	Variação máxima de massa (%)		
	3 dias	7 dias	28 dias
R30	-0,10%	-0,13%	-0,36%
R35	-0,06%	0,00%	-0,33%
R42	-0,09%	-0,20%	-0,55%
0,14-SEC	-0,19%	-0,25%	-0,67%
0,14-UM	-0,08%	-0,20%	-0,70%
0,14-SAT	-0,11%	-0,24%	-0,58%
0,20-SEC	-0,06%	-0,19%	-0,40%
0,20-UM	-0,08%	-0,25%	-0,66%
0,20-SAT	-0,05%	-0,09%	-0,40%
0,27-SEC	-0,03%	-0,16%	-0,60%
0,27-UM	-0,05%	-0,16%	-0,62%
0,27-SAT	-0,05%	-0,14%	-0,42%

Da Figura 39 até a Figura 50 constam os resultados de medidas de retração obtidas de cada prisma ensaiado. Aos pontos que compõem estes gráficos foram adicionadas linhas de tendência. Com as equações das linhas de tendência pode-se calcular o valor de retração para as idades exatas de 3, 7 e 28 dias. Então, a partir da retração calculada nestas 3 idades foram feitas as análises estatísticas. Os valores de retração estão todos contidos na Tabela 6. O tratamento estatístico dos resultados foi realizado com ajuda dos programas Microsoft Office

Excel 2003 e StatSoft Statistica 8. Primeiramente todas as amostras foram analisadas pelo teste de Duncan, para que fosse verificado se há diferença significativa de retração entre as misturas estudadas. Posteriormente, para verificar se o teor de PSA e o modo como ele é adicionado causam algum efeito na retração autógena, foi realizada uma análise de experimentos fatoriais (dois fatores). Os resultados da análise estatística estão expostos no ANEXO B.

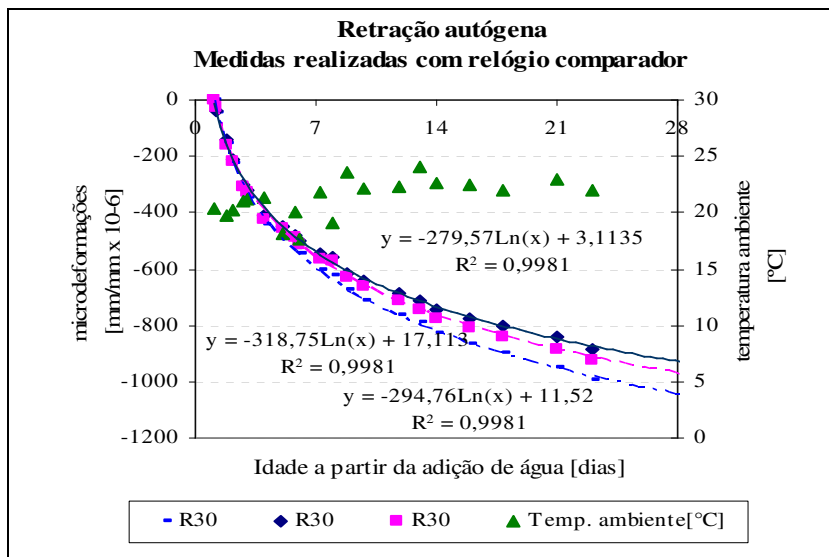


Figura 39 - Retração autógena da mistura R30.

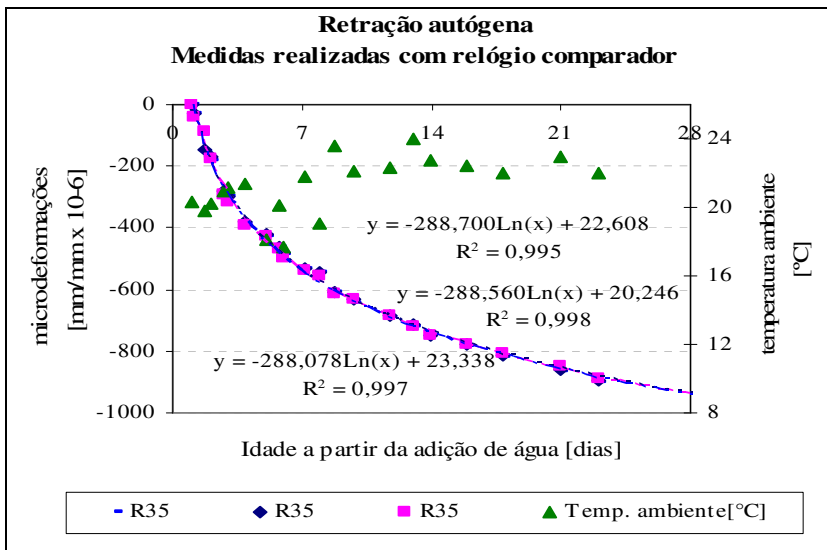


Figura 40 - Retração autógena da mistura R35.

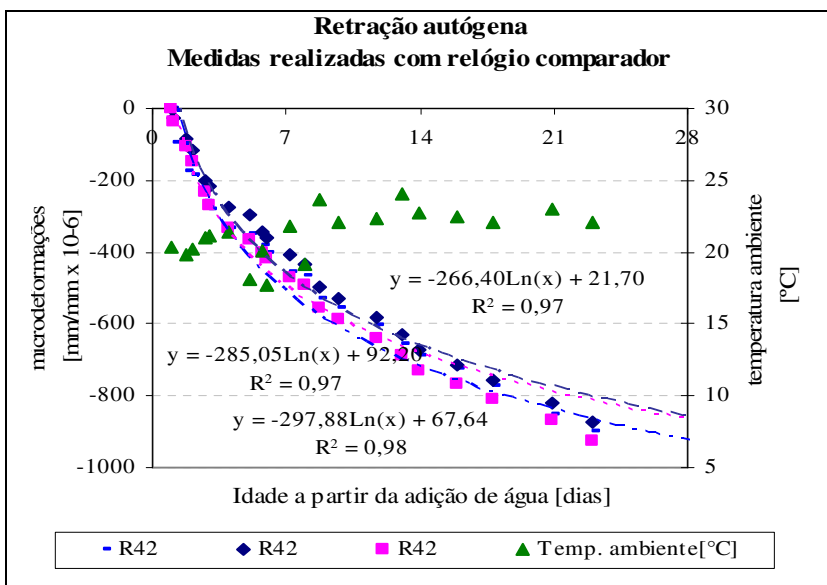


Figura 41 - Retração autógena da mistura R42.

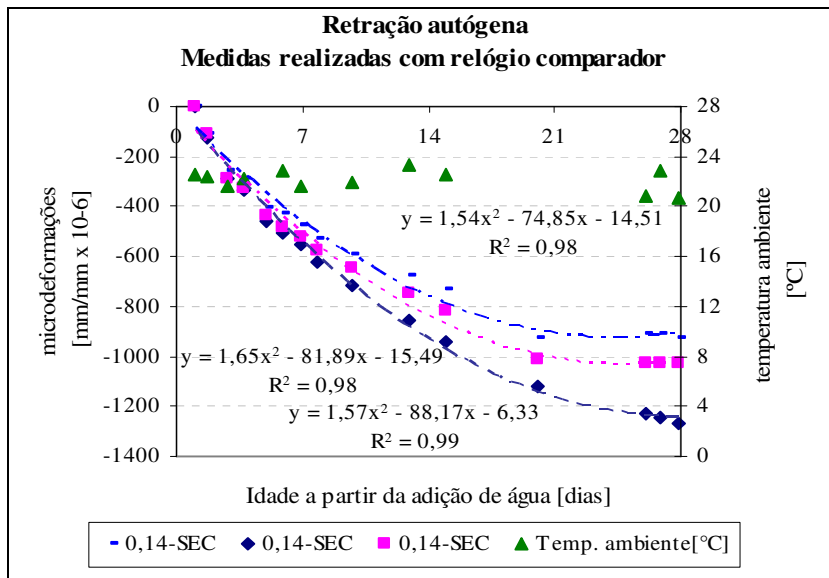


Figura 42 - Retração autógena da mistura 0,14-SEC.

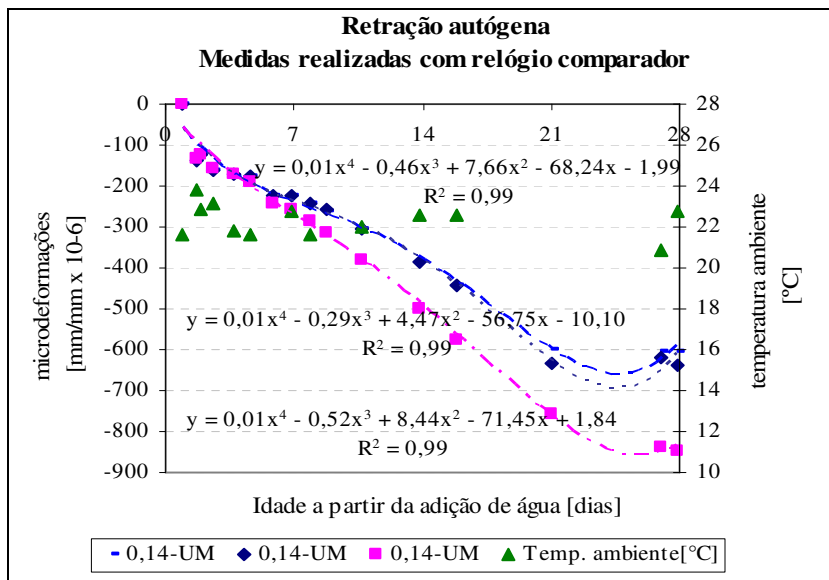


Figura 43 - Retração autógena da mistura 0,14-UM.

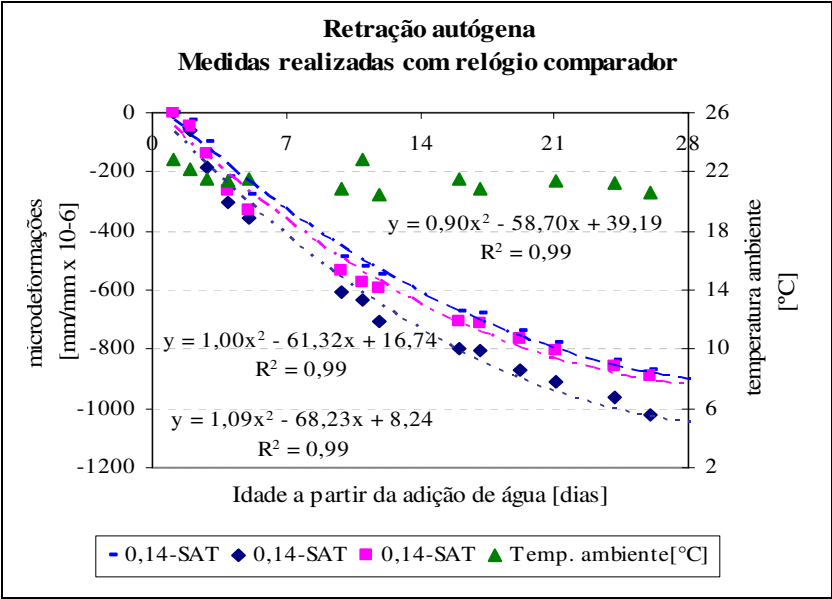


Figura 44 - Retração autógena da mistura 0,14-SAT.

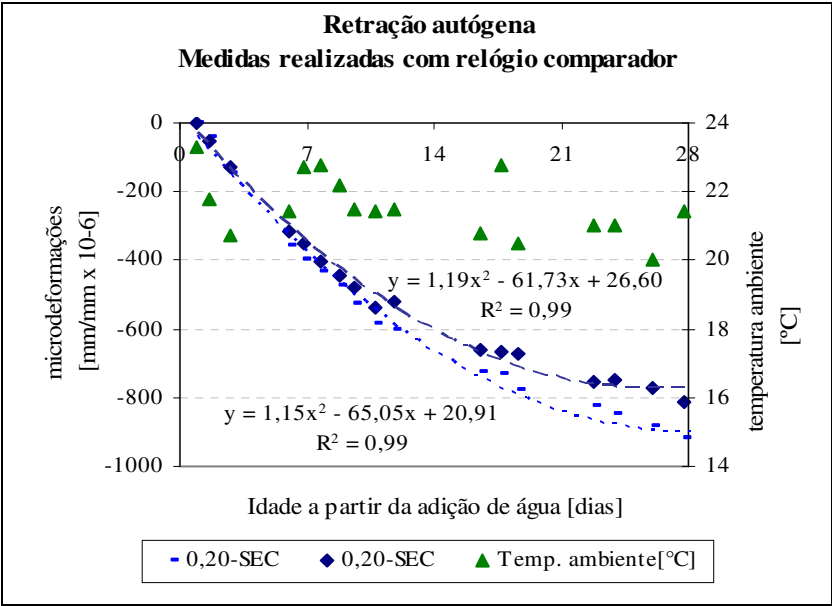


Figura 45 - Retração autógena da mistura 0,20-SEC.

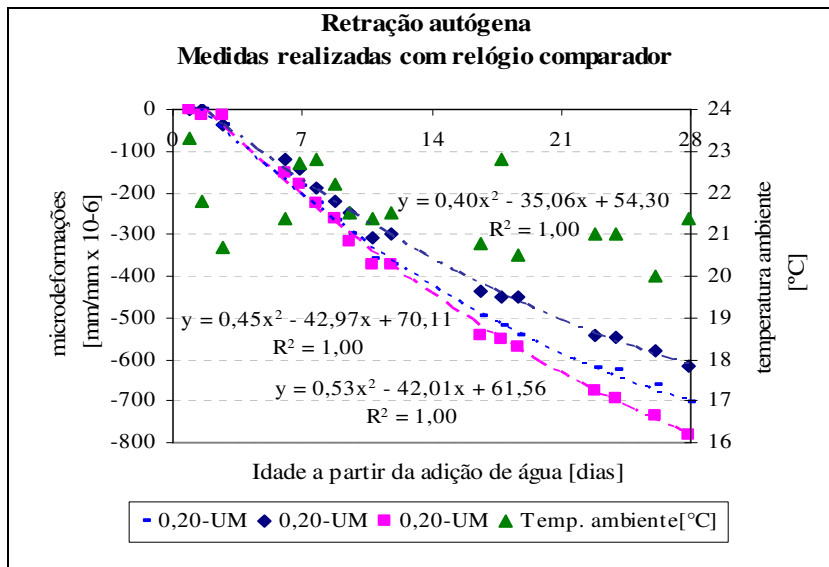


Figura 46 - Retração autógena da mistura 0,20-UM.

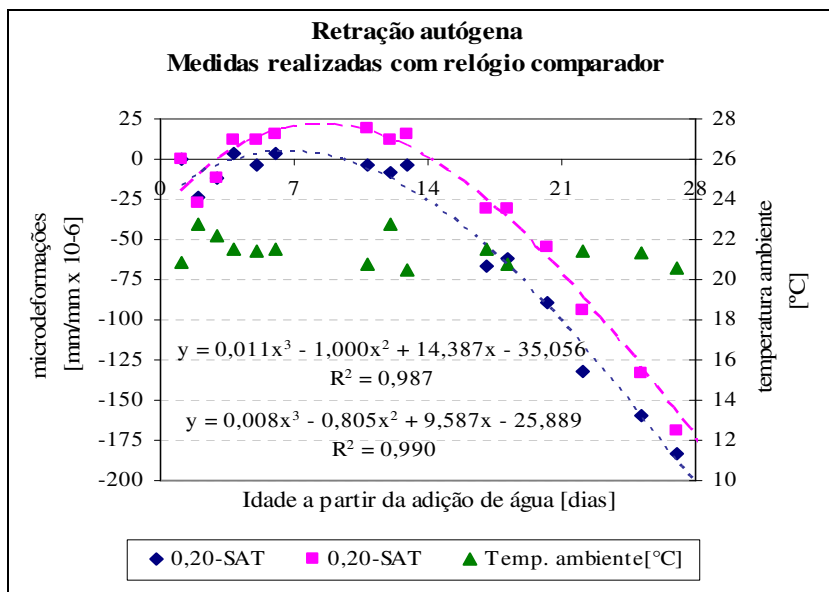


Figura 47 - Retração autógena da mistura 0,20-SAT.

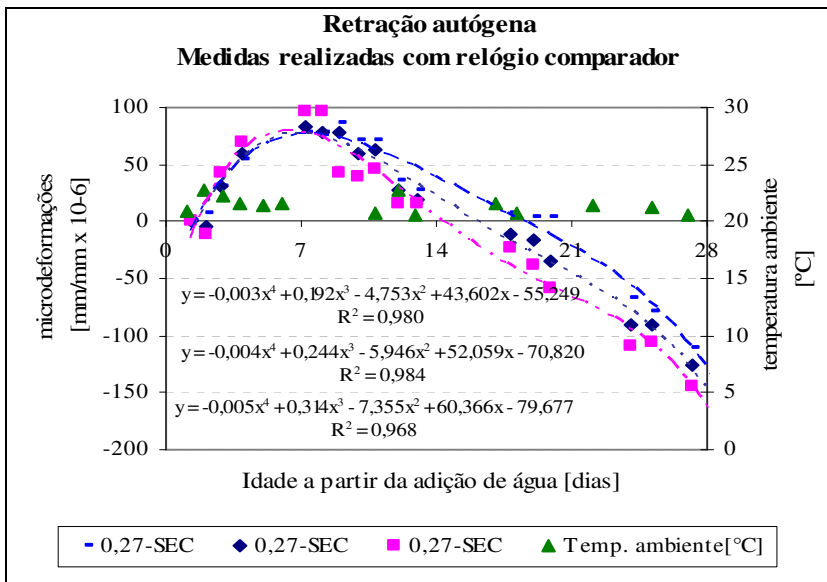


Figura 48 - Retração autógena da mistura 0,27-SEC.

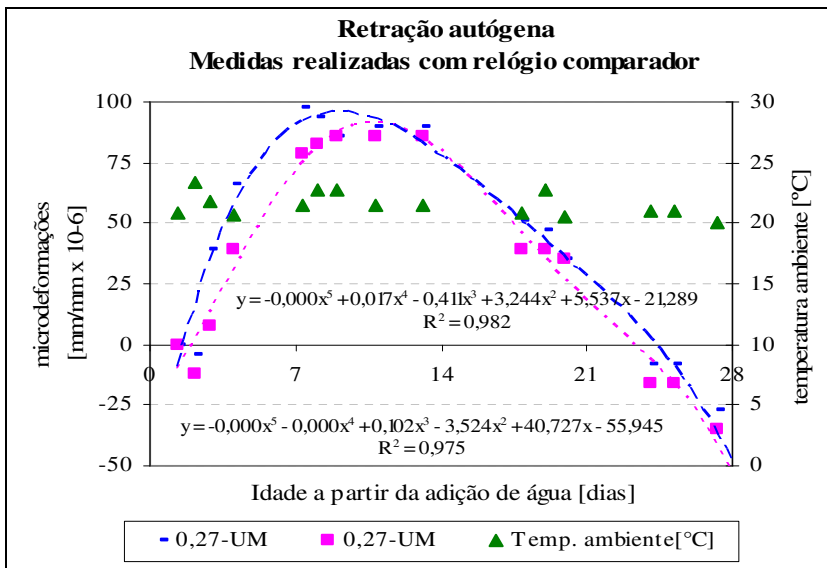


Figura 49 - Retração autógena da mistura 0,27-UM.

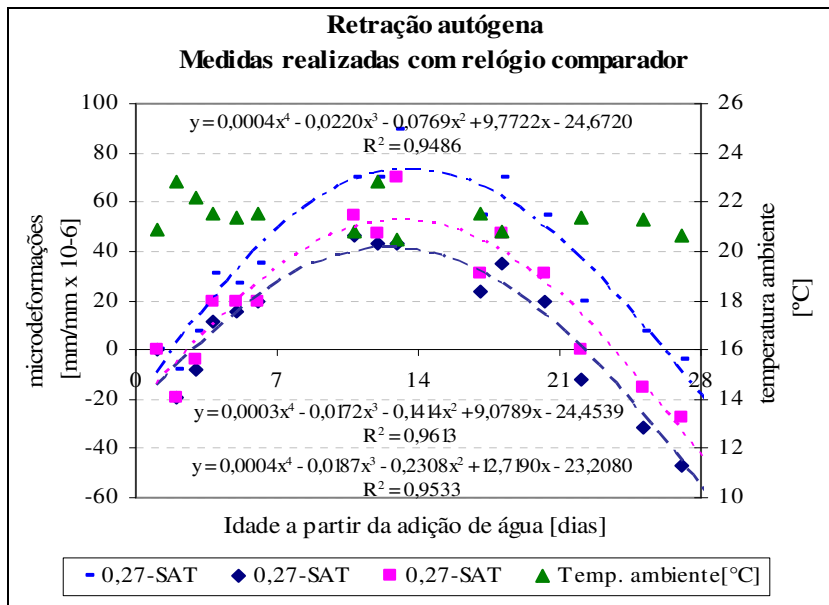


Figura 50 - Retração autógena da mistura 0,27-SAT.

Tabela 6 - Resultados de retração autógena medida com relógio comparador. Os valores advêm da aplicação das equações de linhas de tendência de cada prisma, para as dadas idades. Valores em destaque são estimativas feitas a partir da média dos outros dois corpos de prova que compõem a mesma família. Valores positivos indicam expansão.

Mistura	3 dias		7 dias		28 dias	
	Microdeformações [mm/mm x10 ⁻⁶]	Variação de massa (%)	Microdeformações [mm/mm x10 ⁻⁶]	Variação de massa (%)	Microdeformações [mm/mm x10 ⁻⁶]	Variação de massa (%)
R30	-304,03	-0,10%	-540,90	-0,13%	-928,47	-0,36%
	-333,07	-0,10%	-603,15	-0,10%	-1045,03	-0,28%
	-312,31	-0,10%	-562,06	-0,08%	-970,68	-0,26%
R35	-294,56	-0,09%	-539,18	-0,08%	-939,40	-0,33%
	-296,77	-0,09%	-541,27	-0,08%	-941,29	-0,33%
	-293,15	-0,08%	-537,24	-0,11%	-936,60	-0,27%
R42	-270,97	-0,08%	-496,69	-0,20%	-866,00	-0,55%
	-220,96	-0,03%	-462,48	-0,20%	-857,65	-0,52%
	-259,61	-0,19%	-512,00	-0,17%	-924,95	-0,48%
0,14-UM	-149,45	-0,06%	-240,74	-0,11%	-584,14	-0,28%
	-147,41	-0,11%	-272,86	-0,08%	-830,23	-0,35%
	-149,71	-0,08%	-238,27	-0,20%	-597,80	-0,70%
0,27-UM	14,71	-0,0003	71,48	-0,16%	-58,80	-0,62%
	37,25	-0,0005	90,27	-0,13%	-46,08	-0,57%
	25,98	0,00	80,87	-0,11%	-52,44	
0,14-SEC	-225,23	-0,03%	-463,13	-0,11%	-904,71	-0,29%
	-246,30	-0,05%	-507,85	-0,19%	-1014,91	-0,67%
	-256,70	-0,08%	-546,50	-0,25%	-1242,85	-0,56%
0,27-SEC	37,72	-0,03%	75,91	-0,16%	-129,94	-0,60%
	38,13	-0,03%	77,11	-0,14%	-147,36	-0,57%
	43,32	-0,03%	78,85	-0,14%	-163,95	-0,57%
0,20-UM	-47,30	-0,03%	-171,62	-0,14%	-615,45	-0,41%
	-59,73	0,00%	-206,62	-0,08%	-700,10	-0,35%
	-54,75	-0,08%	-208,66	-0,25%	-781,00	-0,66%
0,20-SEC	-147,88	-0,06%	-347,19	-0,16%	-768,49	-0,40%
	-163,91	-0,06%	-378,22	-0,08%	-901,06	-0,33%
	-155,90	-0,06%	-362,70	-0,19%	-834,77	
0,14-SAT	-128,82	-0,06%	-327,71	-0,15%	-900,81	-0,41%
	-158,27	-0,06%	-363,73	-0,11%	-919,52	-0,58%
	-186,61	-0,06%	-415,82	-0,24%	-1045,70	-0,41%
0,27-SAT	3,39	-0,03%	33,39	-0,10%	-43,42	-0,40%
	1,07	-0,05%	27,07	-0,12%	-55,61	-0,42%
	12,40	0,00%	49,04	-0,14%	-19,05	-0,42%
0,20-SAT	-0,60	-0,03%	20,44	-0,09%	-174,59	-0,40%
	-4,14	-0,05%	4,68	-0,04%	-203,77	-0,33%
	-2,37	-0,03%	12,56	-0,07%	-189,18	

Na Figura 51 são apresentados em forma de gráfico idade x microdeformações os valores médios de retração autógena medida com relógio comparador. Os três pontos que compõem cada curva são os estimados pela análise estatística. A Figura 52 é uma adaptação da Figura 51, que permite melhor visualização do efeito dos teores e modos de adição do polímero na retração autógena.

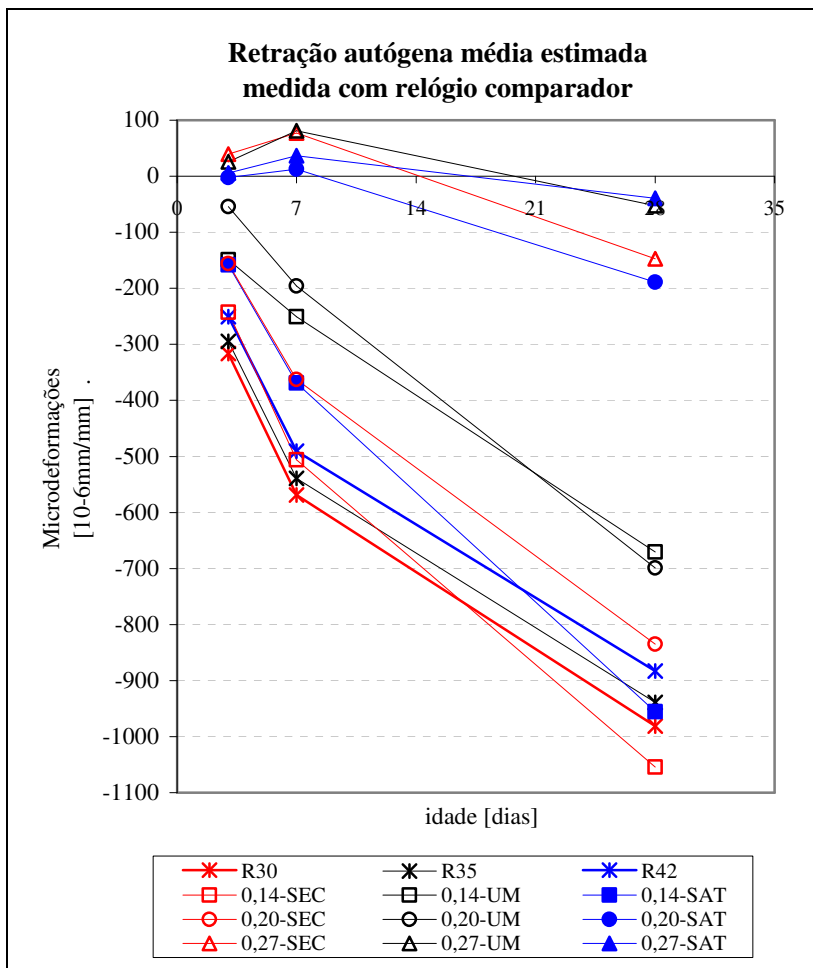


Figura 51 - Retração autógena média, estimada pela análise estatística, em função da idade. Medidas tomadas com relógio comparador. Valores positivos indicam expansão.

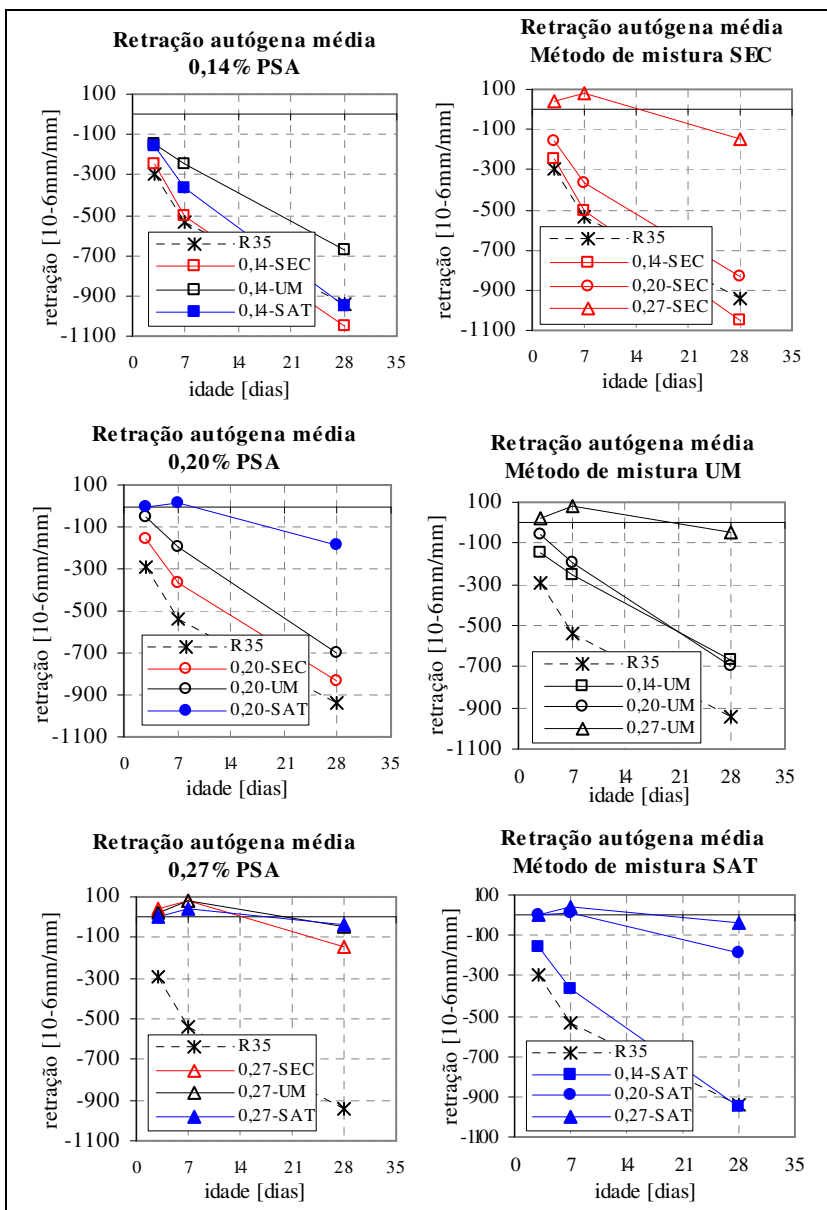


Figura 52 - Efeito do teor de polímero e modo de adição na retração média estimada. Todas as misturas têm mesma relação a/c total. Medidas tomadas com relógio comparador. Valores positivos indicam expansão.

Aos 3 dias, como esperado, a mistura R35 retraiu mais que qualquer das misturas com polímero. Com a mesma idade, quatro misturas obtiveram medidas positivas de microdeformações, o que corresponde à expansão. São as misturas contendo 0,27% de PSA para quaisquer modos de adição e a mistura 0,20-SAT. Comparando os valores de microdeformações destas amostras com o da amostra R35 percebe-se a magnitude do efeito da adição de 0,27% de polímero no fenômeno. Assim, pode-se afirmar que o teor de 0,27% combateu eficientemente a retração autógena aos 3 dias, induzindo ainda um efeito de expansão. Segundo a análise estatística realizada, com 95% de confiabilidade, não se pode afirmar que a retração média estimada para as amostras 0,27-UM e 0,27-SEC sejam diferentes entre si, e nem que as médias estimadas para as misturas 0,27- SAT e 0,20-SAT também o sejam entre si. A mistura 0,20-SAT apresentou-se aos 3 dias também eficiente, com uma deformação de somente -2 microdeformações. Este valor aproxima-se muito de zero, o que significaria a ausência de retração. Comparando-a com as misturas contendo 0,27% de PSA, a mistura 0,20-SAT seria a mais econômica por demandar menos PSA.

Ainda aos 7 dias a mistura R35 retraiu mais que qualquer mistura com PSA. Seguindo a tendência dos resultados de 3 dias, aos 7 dias as mesmas quatro misturas merecem destaque pela eficiência no combate à retração. Nesta idade todas já apresentam valores positivos de microdeformações. Além disso, a análise estatística teve resultados coerentes com a análise estatística dos dados de 3 dias. Isto significa que com 95% de confiabilidade ainda não se pode afirmar que a retração média estimada para as amostras 0,27-UM e 0,27-SEC sejam diferentes entre si, e nem que as médias estimadas para as misturas 0,27-SAT e 0,20-SAT também o sejam entre si.

Contrariando as tendências sugeridas aos 3 e 7 dias, aos 28 dias a pasta 0,14-SEC apresentou a maior retração dentre todas as misturas, incluindo a R30. Além desta mistura, também a 0,14-SAT apresentou resultado desfavorável muito próximo ao de R30.

Confirmando o verificado aos 3 e 7 dias, aos 28 dias são consideradas com melhor desempenho as misturas contendo 0,27% de PSA adicionado em quaisquer dos modos descritos e a pasta 0,20-SAT. Entretanto, é essencial ressaltar que aos 28 dias tais misturas já não apresentam resultados de expansão, mas sim de retração entre -39 e -189 microdeformações. Este fato pode assim mesmo não ser considerado nocivo do ponto de vista prático. Isto porque, com tal idade, estas misturas já apresentam resistência à compressão de no mínimo

48,3MPa, indicando que a resistência de tais misturas à tração possa ser suficiente para resistir à fissuração por retração.

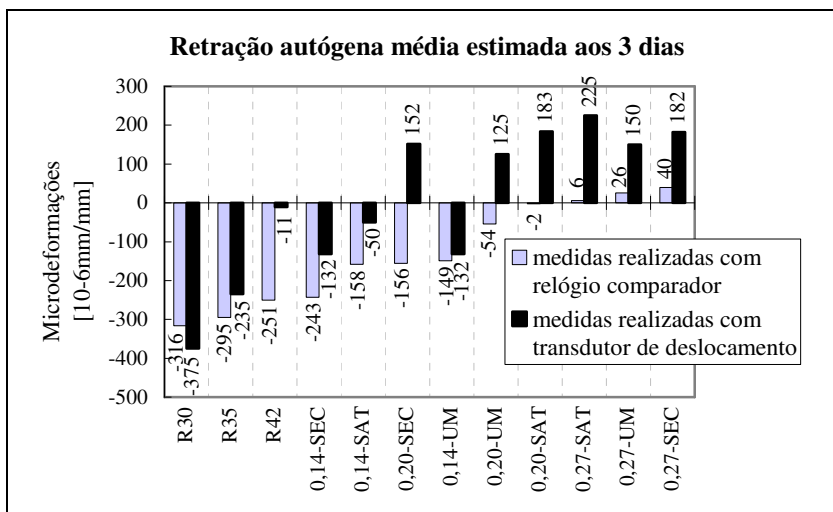


Figura 53 - Representação dos resultados de retração autóloga obtidos pelo ensaio com relógio comparador e pelo ensaio com transdutores de deslocamento.

A análise estatística indicou ainda que, com 95% de confiança, pode-se afirmar que o teor de PSA, o seu modo de adição, bem como a combinação de teor e modo afetam significativamente a retração autóloga das pastas de cimento aos 3, aos 7 e aos 28 dias. Os resultados dos testes de Bartlett, que confirmam o exposto, constam no ANEXO B.

Pode-se também estabelecer uma comparação entre os resultados de retração autóloga obtidos nas medidas com relógio comparador e com transdutores de deslocamento. A Figura 53 contém os resultados obtidos por ambos os métodos, para pastas de cimento ensaiadas aos 3 dias. Não é possível identificar um fator que correlacione matematicamente os resultados obtidos por ambos os métodos. No entanto, percebe-se que as medidas realizadas com transdutores de deslocamento apresentam em geral valores superiores (maior tendência à expansão), enquanto as tomadas no ensaio com relógio comparador apresentam valores mais negativos. Ao mesmo tempo, as misturas avaliadas como sendo as mais eficientes no combate à retração pelo ensaio com relógio comparador também obtiveram bons resultados pelo ensaio com transdutores de deslocamento.

4.1.6 Acompanhamento da variação da temperatura e UR no interior das pastas em ambiente termostatzado

Os dados de evolução da UR interna constam na Figura 54. Eles indicam que, na presença de 0,27% de PSA adicionado pelos métodos seco ou saturado e também na presença de 0,20% de PSA adicionado pelo método seco a UR interna das amostras permaneceu nos maiores patamares, dentre todas as misturas. Este fato vai ao encontro dos resultados de retração autógena medida na bancada, e demonstra a eficiência do polímero em reter a água quando adicionado em tais teores e de tais modos. Estando retida, a água propicia a cura interna do cimento, cumprindo o efeito esperado. É relevante atentar para o fato de que mesmo a mistura R42, contendo mais água que as demais, não superou as curvas de UR interna das referidas amostras. Até a idade de 1 dia, as curvas das pastas com 0,20% e com 0,14% de PSA adicionado pelo método úmido praticamente se sobrepõem às curvas de maior UR. A partir desta idade as curvas passam a apresentar tendências distintas.

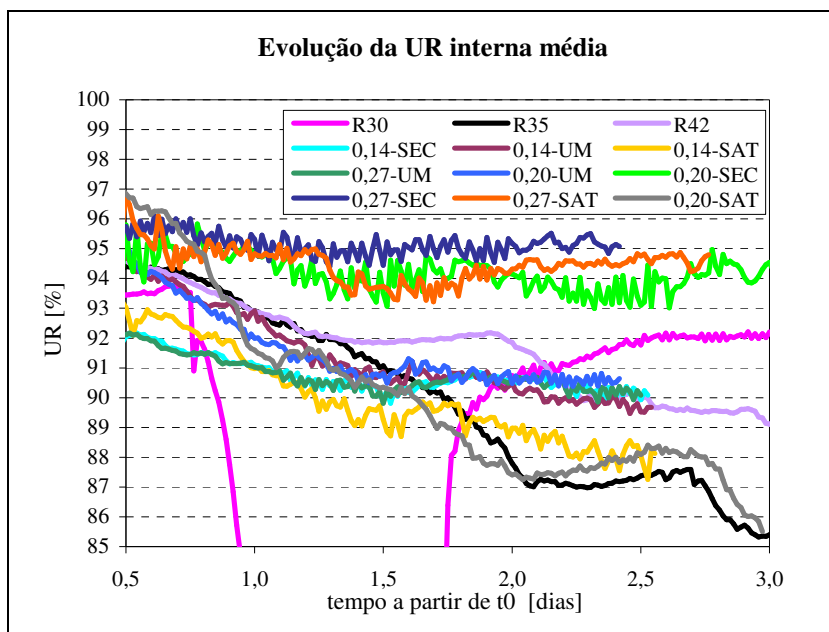


Figura 54 – Curvas de evolução de UR interna das pastas de cimento em ambiente termostatzado. Médias dos resultados obtidos de dois corpos de prova de cada mistura. Medidas tomadas a cada 20 minutos.

A medida da UR interna revela o potencial químico da pasta de cimento, indicando o quão saturado é o ambiente em que os grãos de cimento serão hidratados. Ora, se a água contida no PSA é livre para hidratar o cimento, a retração autógena por efeito da auto-secagem será mais reduzida quão maior a UR interna. O método de mistura UM foi o que menos combateu a queda da UR interna, comparando com a mistura R35.

Sabida a UR interna, podemos estimar a pressão capilar exercida nas paredes dos poros da matriz cimentícia (Eq. 11). Por exemplo, para a mistura contendo 0,27-SEC, cuja UR interna média aos 3 dias foi de 95%, com temperatura média de 21,3 °C ($\approx 294\text{K}$) teríamos:

$$P_c = \frac{\rho_w \cdot R \cdot T}{M_w} \cdot \ln(RH)$$

$$P_c = \frac{1000 \cdot 8,314 \cdot 294,3}{0,018} \cdot \ln(0,951)$$

$$P_c = -6.865.868,54 \text{ Pa}$$

$$P_c = -6,87 \text{ MPa}$$

Enquanto que para a mistura R35, cuja relação água/cimento é idêntica, teríamos:

$$P_c = \frac{\rho_w \cdot R \cdot T}{M_w} \cdot \ln(RH)$$

$$P_c = \frac{1000 \cdot 8,314 \cdot 300,6}{0,018} \cdot \ln(0,853)$$

$$P_c = -21.998.315,86 \text{ Pa}$$

$$P_c = -22,00 \text{ MPa}$$

valor correspondente a mais de 3 vezes a pressão nos poros da amostra com cura interna 0,27-SEC.

Lembrando que o erro dos sensores é de $\pm 3\%$ para UR de 0 até 90% e de $\pm 5\%$ para UR de 90 a 100%, há que se considerar tais variações. As tensões capilares estimadas (Eq. 11) a partir dos resultados de UR interna, já considerando o erro, constam na Figura 55. Ainda na mesma tabela consta uma estimativa de resistência à tração das

pastas, admitida como 10% da resistência à compressão média das pastas de cimento aos 3 dias. A resistência à tração estimada é, em todos os casos, inferior à pressão capilar média, o que aumenta as possibilidades de fissuração por retração.

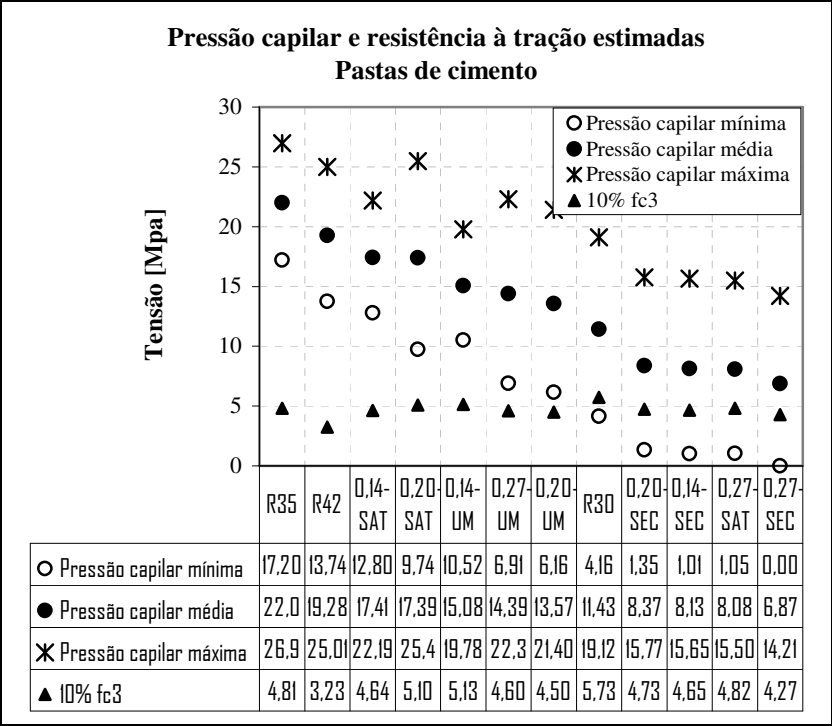


Figura 55 - Pressões capilares estimadas (pela (Eq. 11)) aos 3 dias. A resistência à tração estimada de cada mistura corresponde a 10% da resistência à compressão.

A evolução da temperatura das pastas quando mantidas em banho termostatzado (Figura 56) também tem alguma coerência com as curvas de UR no que diz respeito à separação das curvas em dois agrupamentos distintos, a partir de 1 dia de idade. No primeiro grupo, as misturas 0,27-SEC, 0,27-SAT e 0,20-SEC, que tiveram as menores temperaturas. No segundo grupo todas as demais misturas, cujas temperaturas superaram em até 6 °C a temperatura média do banho termostatzado.

Quando confronta-se as temperaturas das amostras em tubo de ensaio (Figura 38) com as dos respectivos prismas (Figura 56), percebemos que a condição autógena de fato não se verifica para os prismas. Isto porque as medidas de temperatura feitas com termopares revelam resquícios do calor liberado durante a pega, indicando que mesmo tendo uma seção de pequena área (2,5 x 2,5cm) os corpos de prova prismáticos não dissiparam rapidamente o calor de hidratação.

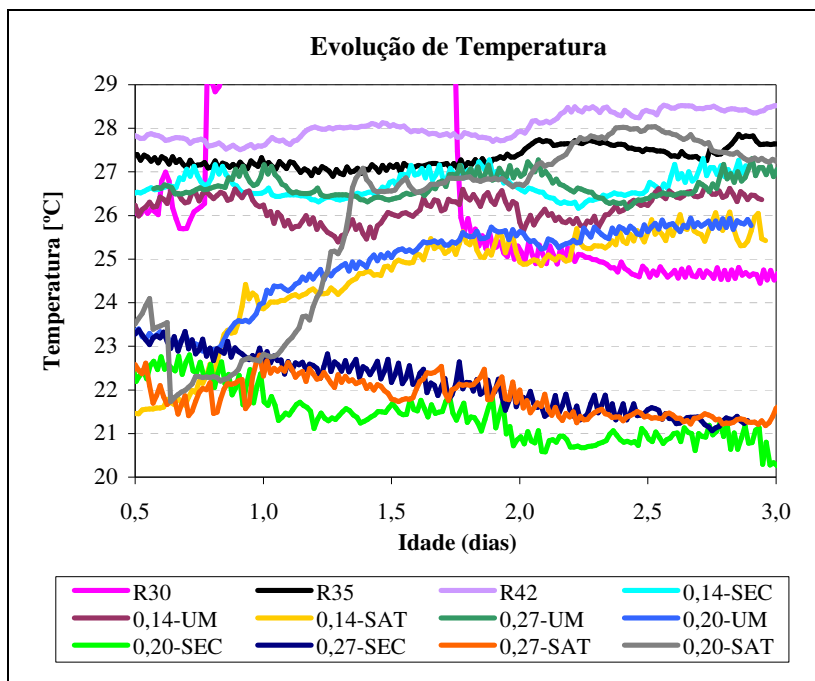


Figura 56 – Curvas de evolução de temperatura das pastas de cimento em ambiente termostatzado. Medidas tomadas a cada 20 minutos através de sensores de umidade e temperatura.

4.1.7 Resistência à Compressão

A Tabela 7 contém os resultados de resistência média à compressão das pastas de cimento aos 3, 7 e 28 dias.

Como esperado, a mistura R42 obteve a menor resistência à compressão e a R30 a maior, para todas as idades e dentre todas as misturas testadas. Analisando os resultados de 3 dias (Figura 57) percebe-se que em geral, a adição de PSA diminuiu a resistência à

compressão das misturas se comparadas à pasta R35, salvo para as misturas 0,20-SAT e 0,14-UM. Estas duas misturas tiveram um pequeno aumento, de aproximadamente 6,0 e 6,8% na resistência à compressão. Do ponto de vista estatístico este incremento de resistência à compressão pode parecer inexpressivo, contudo, do ponto de vista prático este incremento pode representar a mudança de classe, no caso dos concretos. A amostra 0,27-SAT alcançou resistência praticamente igual ao da pasta R35. Estes casos indicam que uma cura interna eficiente pode favorecer tanto o desenvolvimento da micro-estrutura do cimento hidratado que, mesmo havendo poros vazios¹⁵ ao final, a resistência à compressão do material supere a do material não submetido à cura interna. A maior perda de resistência aos 3 dias, para as pastas com adição de polímero, ocorreu para a mistura 0,27-SEC e foi de 11,2%. A diferença percentual das resistências à compressão, com relação à resistência da mistura R35, consta no ANEXO C.

Tabela 7 - Resistência média à compressão das pastas de cimento aos 3, 7 e 28 dias.

Mistura	Resistência média à compressão [MPa]		
	3 dias	7 dias	28 dias
R30	57,26	59,39	76,28
R35	48,08	57,99	59,88
R42	32,31	33,05	41,11
0,14-UM	51,34	51,13	67,00
0,27-UM	45,99	46,41	62,63
0,14-SEC	46,46	55,76	60,77
0,27-SEC	42,72	44,72	60,09
0,20-UM	45,05	46,41	55,80
0,20-SEC	47,26	55,15	58,71
0,14-SAT	46,36	56,38	64,28
0,27-SAT	48,24	48,20	55,56
0,20-SAT	50,97	58,02	67,10

Aos 7 dias a pasta 0,20-SAT alcançou resistência à compressão média idêntica à da amostra R35. A maior queda de resistência

¹⁵ remanescentes da desidratação dos reservatórios de água

ocasionada pela adição de PSA foi de 20,3%, referente à pasta 0,27-UM. A mistura 0,27-SEC teve perda semelhante de resistência.

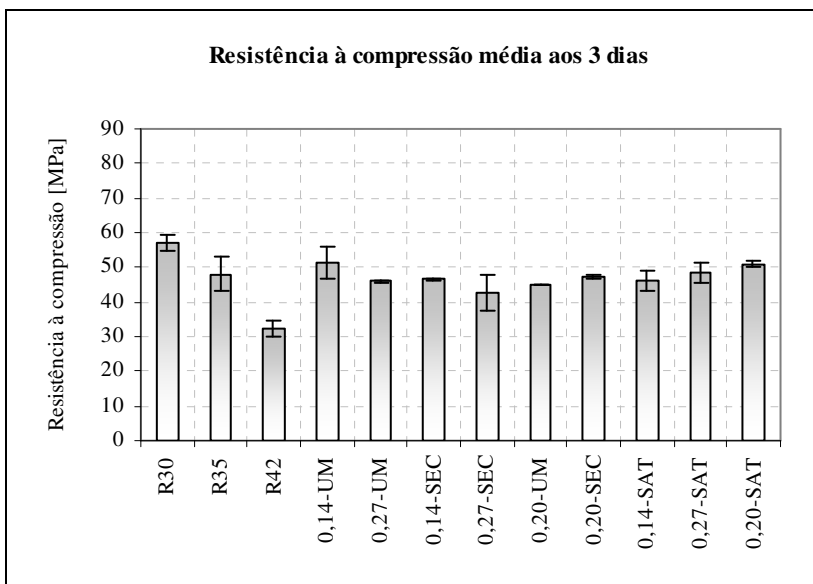


Figura 57 – Resistência à compressão média aos 3 dias.

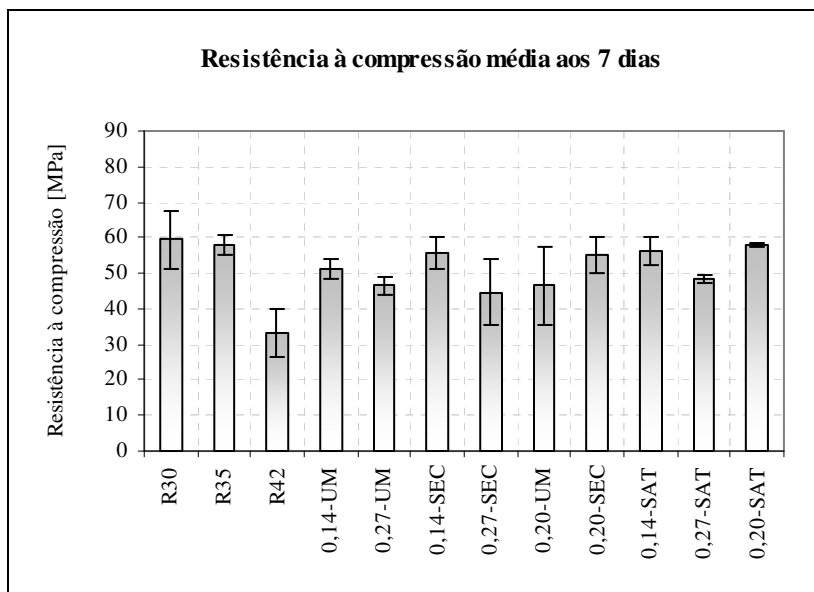


Figura 58 – Resistência à compressão média aos 7 dias.

Para os ensaios de resistência à compressão aos 28 dias foram rompidos, como mencionado anteriormente, 3 corpos-de-prova de cada mistura. Assim pôde-se calcular o coeficiente de variação do ensaio. A Tabela 8 contém os resultados individuais de resistência à compressão aos 28 dias, e os respectivos coeficientes de variação. A mistura com 0,20% de PSA adicionado SECO obteve maior variação (15,6%), mas ainda assim pode ser considerada estatisticamente aceitável.

Ainda aos 28 dias merecem destaque as amostras 0,14-UM e 0,20-SAT, que figuram no grupo das maiores médias, conforme a Figura 59. A maior delas chega a ser 11,6% superior à da correspondente mistura sem PSA (R35).

Em geral, as resistências aos 28 dias foram ligeiramente superiores com o efeito da cura interna. Todavia, estatisticamente não foi possível comprovar¹⁶ que os tratamentos (teor e modo de adição do PSA) tiveram alguma influência na resistência. Os resultados da análise estatística que leva à esta conclusão estão no ANEXO C.

¹⁶ pelo teste de igualdade de variâncias, com 95% de confiabilidade

Tabela 8 - Resultados individuais de resistência à compressão aos 28 dias e respectivos coeficientes de variação.

Mistura	Fc1	Fc2	Fc3	Coef. de Variação
R30	76,97	77,29	74,57	1,9%
R35	67,07	60,40	60,69	6,0%
R42	42,49	40,66	40,17	3,0%
0,14-UM	68,65	60,18	72,16	9,2%
0,27-UM	63,08	63,40	61,40	1,7%
0,14-SEC	64,15	58,20	59,95	5,0%
0,27-SEC	60,91	57,30	62,08	4,1%
0,20-UM	56,49	59,29	51,62	7,0%
0,20-SEC	61,49	48,51	66,12	15,6%
0,14-SAT	66,73	53,86	72,26	14,7%
0,27-SAT	51,22	59,91	-	11,1%
0,20-SAT	66,29	65,41	69,59	3,3%

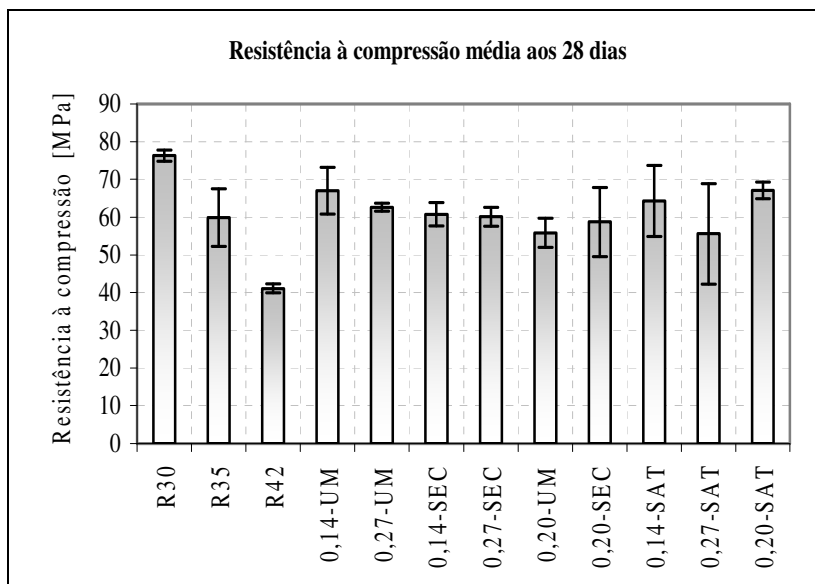


Figura 59 – Resistência à compressão média aos 28 dias.

Na Figura 60 estão plotados os resultados de resistência à compressão das pastas separadas por teor de PSA e por modo de adição. Por esta figura, pode-se perceber que o desenvolvimento da resistência à compressão das misturas feitas pelo método UM, e das misturas contendo 0,27% de PAS apresentam retardo, se comparadas com a mistura R35. Em outras palavras, enquanto para a mistura R35 o maior ganho de resistência se dá entre os 3 e 7 dias, para as misturas UM e as contendo 0,27% de PSA o maior ganho de resistência se dá entre os 7 e 28 dias. Por isso, os resultados obtidos pela mistura R35 geram um gráfico cuja curva tem concavidade voltada para baixo, enquanto as curvas das amostras UM e 0,27 têm concavidade voltada para cima.

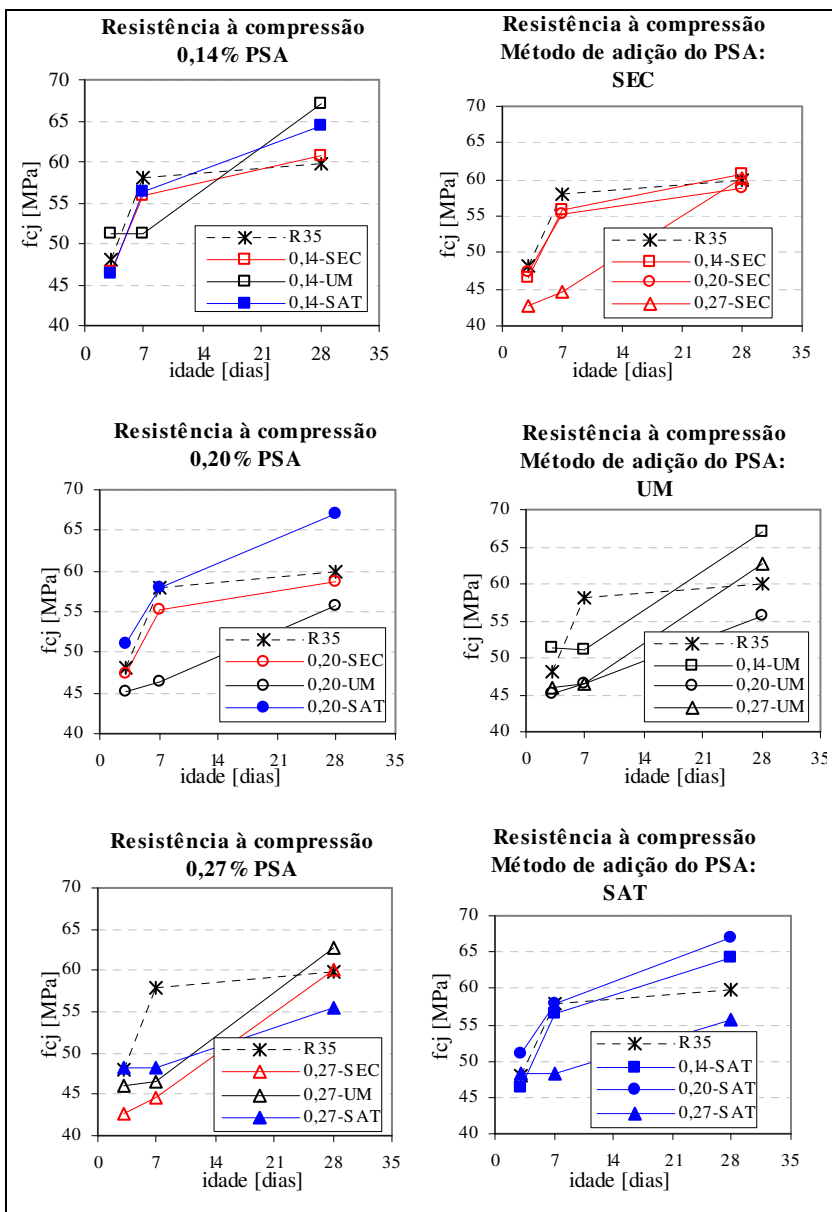


Figura 60 - Agrupamentos das resistências médias à compressão por teor de PSA e método de adição.

4.1.8 Módulo de Elasticidade

Os coeficientes de variação alcançados neste ensaio estiveram dentro do aceitável para todas as misturas. Estes valores estão na Tabela 9, sendo que a variação máxima ocorreu para a mistura R42, e foi de 19,9%.

Tabela 9 - Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade, com respectivas médias e coeficientes de variação.

Mistura	R30	R35	R42	0,14-UM	0,27-UM	0,14-SEC	0,27-SEC	0,20-UM	0,20-SEC	0,14-SAT	0,27-SAT	0,20-SAT
Amostras	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Módulo de Elast. (Ec) [GPa]	45,7	35,5	21,6	26,3	31,7	35,8	18,4	27,7	27,1	32,2	32,0	33,8
	33,0	32,7	32,4	31,1	27,3	35,2	17,3	29,0	28,9	31,9	33,4	36,2
	34,9	35,0	27,6	28,6	25,6	30,3	18,7	27,1	30,7	25,6	25,5	41,5
Média	37,9	34,4	27,2	28,7	28,2	33,7	18,1	27,9	28,9	29,9	30,3	37,2
Desvio Padrão	6,9	1,5	5,4	2,4	3,1	3,0	0,7	1,0	1,8	3,7	4,2	3,9
Coef. de Variação (%)	18,1	4,4	19,9	8,3	11,1	9,0	4,1	3,5	6,3	12,5	13,9	10,5

As médias de módulo de elasticidade com os respectivos desvios-padrão estão também plotadas na Figura 61. Dentre as misturas submetidas à cura interna, a mesma que atingiu maior resistência média à compressão aos 28 dias também obteve maior módulo de elasticidade na mesma idade. A mistura em questão (0,20-SAT) alcançou um módulo de elasticidade médio 8,1% superior ao da mistura R35. Este fato pode ser considerado favorável ao comportamento da mistura com cura interna frente à retração.

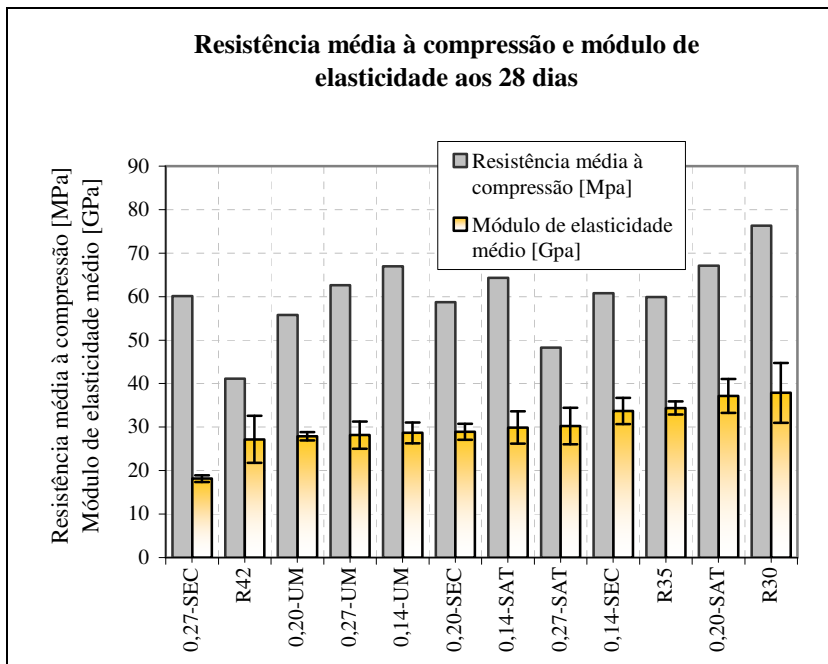


Figura 61- Módulo de elasticidade médio e resistência média à compressão aos 28 dias.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base nos resultados apresentados no Capítulo 4, é possível chegar às seguintes conclusões com relação a utilização de PSA como agente de cura interna no combate à retração:

- Quanto à fluidez, exsudação e segregação

A utilização de PSA em quaisquer dos teores ou modos de adição testados não induziu a segregação nem exsudação das pastas de cimento.

A medida de Flow 0 não representa a fluidez da mistura com fidelidade, por conter grande erro inerente ao desmolde.

O modo de adição SAT diminui a fluidez da mistura, se comparada à mistura com mesma quantidade de água total e sem polímero (R35). Este fato está relacionado à absorção de maior quantidade de água pelo PSA, o que diminui a relação água/cimento efetiva para o amassamento.

O aumento do teor de polímero de 0,14% para 0,27% diminui a fluidez das pastas, para todos os modos de mistura, por implicar em maior absorção de água pelo PSA.

As misturas submetidas à cura interna com PSA apresentaram maior fluidez que a mistura R30. Não foi, entretanto, possível verificar se: a) toda água destinada à cura interna foi absorvida pelo PSA, nem se a água adicionada para cura interna foi absorvida pelo PSA e liberada já nos primeiros instantes após a mistura ou ainda, se as partículas de PSA hidratado exerçam um efeito de rolamento que favoreça a movimentação dos grãos de cimento. O fato de este fenômeno ter acometido inclusive as misturas com 0,27% de PSA (teor de polímero capaz de absorver no mínimo duas vezes a quantidade de água adicionada para cura interna) leva a crer na necessidade de maiores investigações.

- Quanto à massa específica

A utilização de 0,14% de PSA não diminuiu significativamente a massa específica das amostras, em comparação com a mistura R35.

Em geral, maiores teores de polímero aumentaram o teor de ar incorporado, o que diminui a massa específica.

- Quanto à evolução de temperatura

A adoção da curva de evolução de temperatura como instrumento de arbitragem do t_0 foi considerado apropriado. A praticidade de ensaio

e confiabilidade dos resultados de temperatura foram fatores decisórios para a adoção deste método. Ressalta-se que a curva de evolução de temperatura das misturas é também função do isolamento térmico proporcionado pelo calorímetro semi-adiabático utilizado.

- Quanto à retração autógena medida com transdutores de deslocamento

Ao contrário do previsto pelo modelo de Powers (1948), a relação a/c 0,42 não foi capaz de anular a retração autógena. Apesar de até os 3 dias a mistura R42 não ter apresentado valores altos de retração a curva gerada tende a valores mais negativos a partir desta idade.

Todas as amostras contendo PSA combateram com alguma magnitude a retração autógena.

A adição de 0,20% e de 0,27% de PSA resultou em expansão até os 3 dias, superando o combate à retração. A mistura que alcançou maior expansão foi a 0,27-SAT, com até 240 microdeformações positivas aos 3 dias.

A adição de 0,14% de PSA é ineficiente na eliminação da retração, ainda que exerça algum combate.

Não foi possível identificar por este método teor e/ou método ótimos para combate de retração autógena até os 3 dias. Considerar-se-ia ótimo a situação de anulação da retração. Contudo, a magnitude de expansão foi considerada alta, indicando que o teor ótimo de polímero esteja entre 0,14% e 0,20% de PSA.

- Quanto à retração autógena medida com relógio comparador

O fato de cada amostra ter sido ensaiada em diferentes idades dificultou a análise dos resultados. Isto fez necessária a aplicação de regressões matemáticas de diferentes tipos, que melhor se ajustassem aos pontos coletados, o que embutiu erros aos dados finalmente tratados estatisticamente.

A moldagem de 3 corpos-de-prova mostrou-se razoável, haja vista que durante os ensaios alguns espécimes foram danificados e seus resultados descartados. Este fato dificultou as análises estatísticas dos dados.

A mistura com relação a/c 0,42 não anulou, ou esteve próxima de anular, em tempo algum a retração autógena, indo de encontro ao valor teoricamente encontrado por Powers (1948). Para tal mistura foi

registrado um encolhimento de até $924\mu\text{m}/\text{m}$, o que na prática é muito alto.

Todas as amostras submetidas à cura interna retraíram até os 7 dias menos do que a mistura R35, com destaque para as misturas contendo 0,27% de PSA e a mistura 0,20-UM., que combateram de melhor maneira a retração ao longo dos 28 dias de ensaios.

Todas as misturas apresentaram valores negativos de microdeformações aos 28 dias, inclusive aquelas que nas primeiras idades apresentavam tendência à expansão.

Estatisticamente, com 95% de confiabilidade, pôde-se afirmar que o teor, o modo de adição, bem como a combinação entre teor e modo de adição afetam significativamente a retração autógena das pastas de cimento aos 3, aos 7 e aos 28 dias. As misturas com melhores desempenhos dentre todas foram as com 0,27% de PSA, para todos os métodos de adição e idades testados.

O emprego de 0,20% de PSA adicionado pelo método SAT pode ser economicamente mais vantajoso do que o emprego de 0,27% de PSA. O emprego de 0,20% ao invés de 0,27% representa uma economia de aproximadamente 0,26% de polímero, e conduziu a resultados muito próximos aos das misturas com 0,27% de PSA. Como não foi informado o preço do polímero utilizado, não é possível concluir se a proposição se confirma na prática.

- Quanto à variação da temperatura e UR no interior das pastas em ambiente termostatizado

Os resultados de umidade relativa obtidos foram coerentes com os resultados de retração obtidos na bancada de retração com transdutores de deslocamento. Este fato embasa teoricamente os resultados de retração autógena obtidos para as misturas com 0,27% de PSA adicionado pelos modos SEC ou SAT e com 0,20% de PSA adicionado SEC, sendo que em nenhum momento as curvas mencionadas foram superadas pela curva de UR da mistura R42. Para tais misturas com PSA houve de fato uma cura interna efetiva, e sua ocorrência é constatada pela manutenção da UR nos maiores patamares medidos.

O cálculo da tensão capilar média exercida na parede dos poros da pasta de cimento, na idade de 3 dias, levou a valores de tensão superiores à resistência à tração estimada. Isto indica que a possibilidade de fissuração por retração aos 3 dias seja muito grande.

- Quanto à resistência à compressão

As maiores influências da cura interna com PSA na resistência à compressão (comparando à resistência à compressão da mistura R35) foram:

aos 3 dias: perda de 11,2% para a mistura com 0,27-SEC; ganho de 6,8% para a mistura 0,14-UM;

aos 7 dias: perda de 20,3% de resistência para a mistura 0,27-UM. Resistência idêntica à da mistura R35 foi obtida pela mistura 0,20-SAT;

aos 28 dias: perda de 7,5% da resistência para a mistura 0,27- SAT; ganho de 11,5% de resistência para as misturas 0,14-UM e 0,20-SAT.

O método de adição UM, bem como o teor de 0,27% de PSA alteraram a curva de evolução da resistência à compressão significativamente. Ao contrário da curva de R35, estas misturas apresentaram maior ganho de resistência a partir dos 7 dias somente.

Do ponto de vista estatístico o incremento de resistência alcançado por misturas contendo PSA pode parecer inexpressivo, contudo, do ponto de vista prático este incremento pode representar a mudança de classe, no caso dos concretos. Dado o exposto, conclui-se que já aos 3 dias uma cura interna eficiente feita com PSA, mesmo deixando poros vazios com o passar do tempo, pode contribuir para melhor desenvolvimento da micro-estrutura do cimento hidratado.

- Quanto ao módulo de elasticidade (E_{ci})

O método de ensaio utilizado levou a resultados considerados satisfatórios pelos coeficientes de variação alcançados.

Somente a mistura 0,20-SAT superou o módulo de elasticidade da mistura R35.

Principalmente o teor de 0,27% e o modo de adição SAT afetaram o módulo de elasticidade, reduzindo-o em até 47% (mistura 0,27-SEC).

5.1 Escolha do teor de PSA e do modo de mistura

A partir de uma análise global dos resultados é possível avaliar a viabilidade da utilização da cura interna com PSA para uma pasta de cimento tipo CPV-ARI-RS, com relação a/c de 0,30 (mistura R30).

Para realização da cura interna desta mistura com água incorporada, segundo o raciocínio baseado no modelo de Powers, é necessário um aumento da relação a/c em 0,054. Esta água adicional é destinada à cura interna.

O simples aumento da relação a/c de 0,300 para 0,354, sem a utilização de um agente de cura interna, é representado pela mistura R35. Até os 28 dias esta simples adição de água reduziu a retração da mistura R30 em apenas aproximadamente 4,28%, evidenciando sua ineficiência no combate à retração autógena.

O aumento da relação a/c concomitantemente com a utilização de PSA como agente de cura interna, por sua vez, apresentou resultados muito melhores de combate à retração (misturas contendo 0,27% de polímero e mistura 0,20-SAT) com referência à mistura R30. O melhor resultado obtido foi de uma redução de até 96% da retração aos 28 dias, alcançado pela mistura 0,27-SAT. Contudo, esta prática de cura interna sacrificou a resistência à compressão aos 28 dias em mais de 27% e o módulo de elasticidade em aproximadamente 20%.

As misturas 0,27-UM e 0,27-SEC também combateram a retração autógena em pelo menos 94% e 85% respectivamente, com quedas na resistência à compressão de pelo menos 17% e 21% respectivamente. Para tais misturas, houve grandes quedas nos módulo de elasticidade, tendo sido de ao menos 25% para a mistura 0,27-UM e 52% para a mistura 0,27-SEC¹⁷.

A realização de cura interna da mistura R30 com adição 0,20% de PSA pelo modo SAT reduziu a retração aos 28 dias em pelo menos 80%. Do ponto de vista prático, este resultado foi considerado o melhor dentre os alcançados, por ter reduzido a resistência à compressão em apenas 12% e o módulo de elasticidade em menos de 2%. Outra vantagem da cura interna com 0,20% de PSA pelo modo SAT foi o aumento de fluidez (em torno de 8%). Ainda, este modo de adição do polímero é o mais simples dentre os 3 modos testados.

Na Tabela 10 constam os dados nos quais se baseia a escolha da mistura 0,20-SAT como sendo a de melhor desempenho prático dentre as misturas estudadas.

¹⁷ Merece atenção o fato de que o coeficiente de variação do ensaio de módulo de elasticidade da mistura 0,27-SEC foi de apenas 4,1%.

Tabela 10 - Efeitos provocados pelo simples aumento da relação a/c e pela cura interna com PSA, aplicados a uma pasta de cimento com relação a/c 0,30.

Mistura		R30	R35	0,27-SAT	0,27-UM	0,27-SEC	0,20-SAT
Retração autógena aos 28 dias [$\mu\text{m/m}$]		-981	-939	-39	-52	-147	-189
fc28 [MPa]		76,28	59,88	55,56	62,63	60,09	67,10
Eci [GPa]		37,86	34,40	30,26	28,18	18,15	37,17
Flow 20 [mm]		195,5	215,5	201,5	204,5	202,5	212,0
Massa específica [g/cm ³]		2,07	2,02	1,97	2,00	1,97	1,99
Tempo zero [horas]		6,8	8,8	9,4	10,2	10,0	9,9
Pico máximo de temperatura em recipiente semi-adiabático [°C]		100	95	91	92	89	91
Diferença	Retração autógena aos 28 dias [%]	0,00	-4,28	-96,02	-94,70	-85,02	-80,73
	fc28 [%]	0,00	-21,50	-27,16	-17,89	-21,22	-12,03
	Eci [%]	0,00	-9,14	-20,07	-25,57	-52,06	-1,82
	Flow 20 [%]	0,00	10,23	3,07	4,60	3,58	8,44
	Massa específica [%]	0,00	-2,41	-4,97	-3,71	-4,82	-4,15
	Tempo zero [%]	0,00	29,41	38,24	50,00	47,06	45,59
	Pico máximo de temperatura em recipiente semi-adiabático [%]	0,0	-5,0	-9,0	-8,5	-11,0	-9,0

5.2 Sugestões para trabalhos futuros

- Repetir o programa experimental utilizando argamassas e concretos, de maneira a verificar os efeitos da utilização de PSA nestes materiais. Realizar os ensaios de retração com maior número de corpos-de-prova e por maior período;
- avaliar a influência do teor de PSA e modos de adição nas propriedades reológicas de pastas de cimento, de maneira a obter dados mais precisos da influência destes parâmetros nas propriedades do estado fresco;
- estudar a possibilidade de utilização de outros PSA's disponíveis no mercado para cura interna. Há uma imensidão de materiais semelhantes disponíveis no mercado de produtos higiênicos;

- estudar a perda de fluidez das pastas de cimento, visando avaliar a dessorção de água contida no PSA;
- avaliar microscopicamente as amostras submetidas à cura interna com PSA, de modo a identificar as alterações na microestrutura da pasta de cimento hidratado e entender como esta prática de cura interfere na resistência à compressão;
- repetir os experimentos em pasta com cimento que não seja do tipo Alta Resistência Inicial, de modo a verificar como se dá a evolução da resistência à compressão entre os 3 e 7 dias e entre os 7 e 28 dias.

ANEXO A

O calorímetro semi-adiabático de poliestireno expandido, desenvolvido por SOUZA (2007), apresenta dimensões externas de 44x44x49cm e internas de 24x24x18cm. O mesmo tem a superfície exterior revestida com filme de alumínio de forma a contribuir para o isolamento térmico. As dimensões da tampa do calorímetro constam na Figura 62.

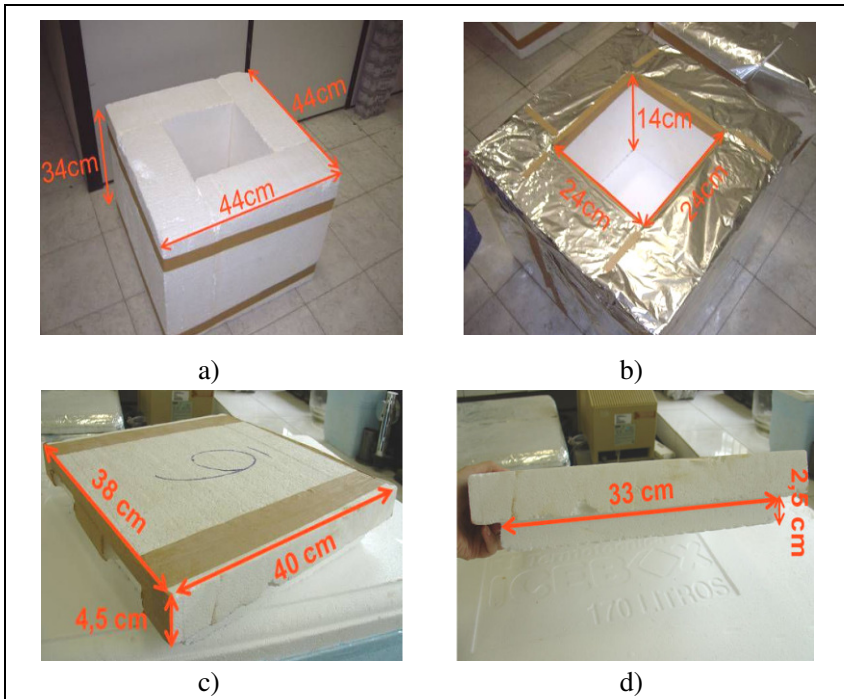


Figura 62 - Detalhes do calorímetro semi-adiabático durante sua confecção. Em a) dimensões externas. Em b) dimensões internas e revestimento das faces externas com filme de alumínio. Em c) e d) dimensões da tampa do calorímetro.

ANEXO B

As tabelas Tabela 11, Tabela 13 e Tabela 15 contêm os resultados de retração autógena de cada corpo de prova prismático ensaiado com relógio comparador. Para os corpos de prova descartados os valores de retração foram admitidos como a média dos outros dois que compõem a amostra. Estes valores estão em destaque nas tabelas.

A Tabela 12, a Tabela 14 e a

Tabela 16 contêm os resultados de retração média, medida com relógio comparador. Os agrupamentos representam as misturas para as quais não foi verificada diferença significativa entre as médias. Análises estatísticas feitas com auxílio dos softwares Microsoft Office Excel 2003 e StatSoft Statistica 8.0. Teste de Duncan realizado para ANOVA post-hoc de simples fator, com $\alpha = 5\%$. A Figura 63, Figura 64 e Figura 65 contêm os resultados de análise estatística de experimentos fatoriais para as amostras submetidas ao ensaio de retração medida com relógio comparador. Esta análise visa verificar se há influência significativa dos tratamentos sobre a retração. Neste caso os tratamentos considerados foram os teores de PSA e os modos de adição.

Tabela 11 - Retração medida com relógio comparador aos 3 dias, em 3 corpos de prova. Os dados em destaque representam valores assumidos para corpos de prova descartados (médias dos outros dois que complementam o grupo).

Mistura	Retração [10^{-6} mm/mm]			n	média	desvio padrão
R30	-304,03	-333,07	-312,31	3	-316,47	14,96
R35	-294,56	-296,77	-293,15	3	-294,83	1,82
R42	-270,97	-220,96	-259,61	3	-250,51	26,21
0,14-UM	-149,45	-147,41	-149,71	3	-148,85	1,26
0,27-UM	14,71	37,25	25,98	3	25,98	11,27
0,14-SEC	-225,23	-246,30	-256,70	3	-242,74	16,03
0,27-SEC	37,72	38,13	43,32	3	39,73	3,12
0,20-UM	-47,30	-59,73	-54,75	3	-53,92	6,26
0,20-SEC	-147,88	-163,91	-155,90	3	-155,90	8,02
0,14-SAT	-128,82	-158,27	-186,61	3	-157,90	28,89
0,27-SAT	3,39	1,07	12,40	3	5,62	5,98
0,20-SAT	-0,60	-4,14	-2,37	3	-2,37	1,77

Tabela 12 - Retração média medida com relógio comparador aos 3 dias e resultado da análise estatística ANOVA.

Mistura	Retração média estimada aos 3 dias [10-6mm/mm]	Grupos entre os quais as médias não diferem significativamente, com 95% de confiabilidade						
		G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7
R30	-316		•					
R35	-295		•					
R42	-251			•				
0,14-SEC	-243			•				
0,14-SAT	-158	•						
0,20-SEC	-156	•						
0,14-UM	-149	•						
0,20-UM	-54							•
0,20-SAT	-2				•			
0,27-SAT	6				•	•		
0,27-UM	26					•	•	
0,27-SEC	40						•	

Tabela 13 - Retração medida com relógio comparador aos 7 dias, em 3 corpos de prova. Os dados em destaque representam valores assumidos para corpos de prova descartados (médias dos outros dois que complementam o grupo).

Mistura	Retração [10^{-6} mm/mm]			n	media	desvio padrão
R30	-540,90	-603,15	-562,06	3	-568,70	31,65
R35	-539,18	-541,27	-537,24	3	-539,23	2,01
R42	-496,69	-462,48	-512,00	3	-490,39	25,35
0,14-UM	-240,74	-272,86	-238,27	3	-250,62	19,30
0,27-UM	71,48	90,27	80,87	3	80,87	9,40
0,14-SEC	-463,13	-507,85	-546,50	3	-505,83	41,72
0,27-SEC	75,91	77,11	78,85	3	77,29	1,48
0,20-UM	-171,62	-206,62	-208,66	3	-195,63	20,82
0,20-SEC	-347,19	-378,22	-362,70	3	-362,70	15,52
0,14-SAT	-327,71	-363,73	-415,82	3	-369,09	44,30
0,27-SAT	33,39	27,07	49,04	3	36,50	11,31
0,20-SAT	20,44	4,68	12,56	3	12,56	7,88

Tabela 14 - Retração média medida com relógio comparador aos 7 dias e resultado da análise estatística ANOVA.

Mistura	Retração média estimada aos 7 dias [10-6mm/mm]	Grupos entre os quais as médias não diferem significativamente, com 95% de confiabilidade							
		G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
R30	-569	•							
R35	-539	•	•						
0,14-SEC	-506		•	•					
R42	-490			•					
0,14-SAT	-369				•				
0,20-SEC	-363				•				
0,14-UM	-251							•	
0,20-UM	-196								•
0,20-SAT	13					•			
0,27-SAT	37					•			
0,27-SEC	77						•		
0,27-UM	81						•		

Tabela 15 - Retração medida com relógio comparador aos 28 dias, em 3 corpos de prova. Os dados em destaque representam valores assumidos para corpos de prova descartados (médias dos outros dois que complementam o grupo).

Mistura	Retração [10^{-6} mm/mm]			n	media	desvio padrão
R30	-928,47	-1045,03	-970,68	3	-981,39	59,01
R35	-939,40	-941,29	-936,60	3	-939,10	2,36
R42	-866,00	-857,65	-924,95	3	-882,87	36,69
0,14-UM	-584,14	-830,23	-597,80	3	-670,72	138,31
0,27-UM	-58,80	-46,08	-52,44	3	-52,44	6,36
0,14-SEC	-904,71	-1014,91	-1242,85	3	#####	172,46
0,27-SEC	-129,94	-147,36	-163,95	3	-147,08	17,01
0,20-UM	-615,45	-700,10	-781,00	3	-698,85	82,78
0,20-SEC	-768,49	-901,06	-834,77	3	-834,77	66,28
0,14-SAT	-900,81	-919,52	-1045,70	3	-955,35	78,81
0,27-SAT	-43,42	-55,61	-19,05	3	-39,36	18,61
0,20-SAT	-174,59	-203,77	-189,18	3	-189,18	14,59

Tabela 16 - Retração média medida com relógio comparador aos 28 dias e resultado da análise estatística ANOVA.

Mistura	Retração média estimada aos 28 dias [10-6mm/mm]	Grupos entre os quais as médias não diferem significativamente, com 95% de confiabilidade					
		G1	G2	G3	G4	G5	G6
0,14-SEC	-1054	•					
R30	-981	•	•				
0,14-SAT	-955	•	•	•			
R35	-939	•	•	•			
R42	-883		•	•			
0,20-SEC	-835			•			
0,20-UM	-699						•
0,14-UM	-671						•
0,20-SAT	-189				•		
0,27-SEC	-147				•	•	
0,27-UM	-52				•	•	
0,27-SAT	-39					•	

Retração aos 3 dias [10-6 mm/mm]			
	0,14% PSA	0,20% PSA	0,27% PSA
Seco	-225,23	-147,88	37,72
	-246,30	-163,91	38,13
	-256,70	-155,90	43,32
Soma	-728,23	-467,69	119,18
Soma dos Quadrados	177.285,56	73.040,02	4.753,74
N	3	3	3
Desv. Pad	16,03	8,02	3,12
Média	-242,74	-155,90	39,73
Úmido	-149,45	-47,30	14,71
	-147,41	-59,73	37,25
	-149,71	-54,75	25,98
Soma	-446,56	-161,77	77,94
Soma dos Quadrados	66.475,09	8.801,53	2.278,82
N	3	3	3
Desv. Pad	1,26	6,26	11,27
Média	-148,85	-53,92	25,98
Saturado	-128,82	-0,60	3,39
	-158,27	-4,14	1,07
	-186,61	-2,37	12,40
Soma	-473,70	-7,10	16,86
Soma dos Quadrados	76.467,28	23,11	166,37
N	3	3	3
Desv. Pad	28,89	1,77	5,98
Média	-157,90	-2,37	5,62

ANOVA

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	F0,05(8 , 15)
Tratamento	247.681,61	8	30.960,20	203,01	2,64
Resíduo	2.745,08	18	152,50		
Total	250.426,69	26			

Com 95% de confiabilidade HÁ influência significativa dos tratamentos.

ANOVA

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	F0,05(,)
Teor de PSA	193.192,35	2	96.596,17	633,40	3,68
Modo de adição do PSA	25.127,43	2	12.563,72	82,38	3,68
Teor x Modo	29.361,83	4	7.340,46	48,13	3,06
Resíduo	2.745,08	18	152,50		
Total	250.426,69	26			

Figura 63 - Verificação da influência dos tratamentos na retração média aos 3 dias. Os dados em destaque representam valores assumidos para corpos de prova descartados (médias dos outros dois que complementam o grupo).

Retração aos 7 dias [10-6 mm/mm]			
	0,14% PSA	0,20% PSA	0,27% PSA
Seco	-463,13	-347,19	-129,94
	-507,85	-378,22	-147,36
	-546,50	-362,70	-163,95
Soma	-1.517,49	-1.088,11	-441,25
Soma dos Quadrados	771.070,65	395.145,98	65.477,91
N	3	3	3
Desv. Pad	41,72	15,52	17,01
Média	-505,83	-362,70	-147,08
Úmido	-240,74	-171,62	-58,80
	-272,86	-206,62	-46,08
	-238,27	-208,66	-52,44
Soma	-751,87	-586,89	-157,33
Soma dos Quadrados	189.179,90	115.682,34	8.331,61
N	3	3	3
Desv. Pad	19,30	20,82	6,36
Média	-250,62	-195,63	-52,44
Saturado	-327,71	20,44	-43,42
	-363,73	4,68	-55,61
	-415,82	12,56	-19,05
Soma	-1.107,26	37,68	-118,08
Soma dos Quadrados	412.603,21	597,32	5.340,55
N	3	3	3
Desv. Pad	44,30	7,88	18,61
Média	-369,09	12,56	-39,36

ANOVA

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	F0,05(8 , 15)
Tratamento	736.163,32	8	92.020,42	150,90	2,64
Resíduo	10.976,40	18	609,80		
Total	747.139,73	26			

Com 95% de confiabilidade HÁ influência significativa dos tratamentos.

ANOVA

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	F0,05(,)
Teor de PSA	405.488,02	2	202.744,01	332,48	3,68
Modo de adição do PSA	220.612,49	2	110.306,24	180,89	3,68
Teor x Modo	110.062,82	4	27.515,70	45,12	3,06
Resíduo	10.976,40	18	609,80		
Total	747.139,73	26			

Figura 64 - Verificação da influência dos tratamentos na retração média aos 7 dias. Os dados em destaque representam valores assumidos para corpos de prova descartados (médias dos outros dois que complementam o grupo).

Retração aos 28 dias [10-6 mm/mm]			
	0,14% PSA	0,20% PSA	0,27% PSA
Seco	-904,71	-768,49	-129,94
	-1.014,91	-901,06	-147,36
	-1.242,85	-834,77	-163,95
Soma	-3.162,47	-2.504,32	-441,25
Soma dos Quadrados	3.393.219,49	2.099.331,72	65.477,91
N	3	3	3
Desv. Pad	172,46	66,28	17,01
Média	-1.054,16	-834,77	-147,08
Úmido	-584,14	-615,45	-58,80
	-830,23	-700,10	-46,08
	-597,80	-781,00	-52,44
Soma	-2.012,17	-2.096,55	-157,33
Soma dos Quadrados	1.387.868,07	1.478.884,28	8.331,61
N	3	3	3
Desv. Pad	138,31	82,78	6,36
Média	-670,72	-698,85	-52,44
Saturado	-900,81	-174,59	-43,42
	-919,52	-203,77	-55,61
	-1.045,70	-189,18	-19,05
Soma	-2.866,04	-567,54	-118,08
Soma dos Quadrados	2.750.474,10	107.793,72	5.340,55
N	3	3	3
Desv. Pad	78,81	14,59	18,61
Média	-955,35	-189,18	-39,36

ANOVA

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	F0,05(8 , 15)
Tratamento	3.979.827,34	8	497.478,42	66,61	2,64
Resíduo	134.431,63	18	7.468,42		
Total	4.114.258,97	26			

Com 95% de confiabilidade HÁ influência significativa dos tratamentos.

ANOVA

Fonte	SQ	GDL	MQ	F	F0,05(,)
Teor de PSA	3.026.270,94	2	1.513.135,47	202,60	3,68
Modo de adição do PSA	386.605,88	2	193.302,94	25,88	3,68
Teor x Modo	566.950,52	4	141.737,63	18,98	3,06
Resíduo	134.431,63	18	7.468,42		
Total	4.114.258,97	26			

Figura 65 - Verificação da influência dos tratamentos na retração média aos 28 dias. Os dados em destaque representam valores assumidos para corpos de prova descartados (médias dos outros dois que complementam o grupo).

ANEXO C

A Tabela 17, Tabela 18 e Tabela 19 contém os resultados médios de resistência à compressão das pastas de cimento estudadas, aos 3, 7 e 28 dias respectivamente. A diferença percentual com relação à mistura de referência, sem PSA, também é apresentada. Percentuais negativos indicam uma redução de resistência e positivos indicam incremento.

Tabela 17 - Resistência à compressão aos 3 dias e diferença percentual com relação à mistura R35.

Mistura	Resistência à compressão média aos 3 dias [MPa]	Diferença percentual em relação à mistura R35
R42	32,3	-32,8%
0,27-SEC	42,7	-11,2%
0,20-UM	45,0	-6,3%
0,27-UM	45,8	-4,7%
0,14-SAT	46,4	-3,6%
0,14-SEC	46,5	-3,4%
0,20-SEC	47,3	-1,7%
R35	48,1	0,0%
0,27-SAT	48,2	0,3%
0,20-SAT	51,0	6,0%
0,14-UM	51,3	6,8%
R30	57,3	19,1%

Tabela 18 - Resistência à compressão aos 7 dias e diferença percentual com relação à mistura R35.

Mistura	Resistência à compressão média aos 7 dias [MPa]	Diferença percentual em relação à mistura R35
R42	33,1	-40,7%
0,27-UM	44,4	-20,3%
0,27-SEC	44,7	-19,8%
0,20-UM	46,4	-16,8%
0,27-SAT	48,2	-13,6%
0,14-UM	51,1	-8,3%
0,20-SEC	55,2	-1,1%
0,14-SEC	55,8	0,0%
0,14-SAT	56,4	1,1%
R35	58,0	4,0%
0,20-SAT	58,0	4,0%
R30	59,4	6,5%

Tabela 19 - Resistência à compressão aos 28 dias e diferença percentual com relação à mistura R35.

Mistura	Resistência à compressão média aos 28 dias [MPa]	Diferença percentual em relação à mistura R35
R42	41,1	-34,1%
0,27-SAT	48,3	-22,6%
0,20-UM	55,8	-10,6%
0,20-SEC	58,7	-5,9%
R35	59,9	-4,0%
0,27-SEC	60,1	-3,7%
0,14-SEC	60,8	-2,6%
0,27-UM	62,4	0,0%
0,14-SAT	64,3	3,0%
0,20-SAT	65,9	5,5%
0,14-UM	67,0	7,4%
R30	76,3	22,2%

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS
NBR 7217 - Agregados - determinação da composição granulométrica.
ABNT, Rio de Janeiro (1987) 3 p.

_____. **NBR 13278 - Argamassa para Assentamento em Paredes e Revestimentos de Paredes e Tetos - Determinação da Densidade de Massa e do Teor de Ar Incorporado - Método de Ensaio.** Rio de Janeiro: ABNT, 1995.

_____. **NBR 13276 - Argamassas para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação do teor de água para obtenção do índice de consistência Padrão.** Rio de Janeiro: ABNT, (1995).

_____. **NBR 8522: Concreto – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação.** Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

AİTCIN, P.-C.; NEVILLE, A.M.; ACKER, P. **Integrated View of Shrinkage Deformation**, Concrete International, V. 19, No. 9, September 1997, pp. 35-41.

AİTCIN, P.-C. **Curing high performance concrete to minimize shrinkage.** In: High-performance concrete Series 5. 1 ed. E. & FN Spon, 1998, p. 311- 337.

ALMUSALLAM, A., KHAN, F. M. AND MASLEHUDDIN, M., **Performance of concrete coatings under varying exposure conditions**, Materials and Structures, vol. 35, September-October, 2002, p 487-494.

ASTM - AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS.
ASTM C 490: Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete. USA (2003), 5p.

BASF. **Rheocure 736: “Internal curing” liquid admixture.** Disponível em: <<http://www.mbtaus.com.au/acrobat/rcure736.pdf>>. Página visualizada em março de 2007.

BENTZ, D.P.; JENSEN, O.M.; HANSEN, K.K.; OLESEN, J.F.; STANG, H.; HAECKER, C.J. **Influence of Cement Particle Size Distribution on Early Age Autogenous Strains and Stresses in Cement-Based Materials.** *Journal of the American Ceramic Society* 84 (1) (2001) 129-135.

CHARRON, J.-P. **Contribution à l'étude du comportement au jeune âge des matériaux cimentaires en conditions de déformations libre et restreinte.** Université Laval, (2002) Ph.D. Thesis.

DAL MOLIN, D. C. C. **Adições minerais para concreto estrutural.** In: Geraldo Isaia. (Org.). Concreto. Ensino, Pesquisa e Realizações. 1 ed. São Paulo: IBRACON, 2005, v. 1, p. 1-31.

NARSAVAGE-HEALD, D. **Poliaspartatos térmicos são uma alternativa biodegradável para substituir poliacrilatos e outros polímeros solúveis em água utilizados atualmente.** Disponível em: <<http://academic.scranton.edu/faculty/CANNM1/polymer/polymermoduport.html>>. Página visualizada em março de 2007.

ESPING, O. **Early age properties of self-compacting concrete - Effects of fine aggregate and limestone filler.** Doctoral Thesis. Department of Civil and Environmental Engineering, Building Technology, Chalmers University of Technology, 2007. 204pp.

ESPING, O.; LÖFGREN I. **Investigation of early age deformation in self-compacting concrete.** In: 2nd International Symposium on Advances in Concrete Science, 11-15 September, Quebec, Canada, 2006.

FERRARIS, C. F.; WITTMANN, F. H. **Shrinkage mechanisms of hardened cement paste.** Cement and Concrete Research, Volume 17, Issue 3, May 1987, Pages 453-464.

FONTANA, P.; MENG, B. **Influence of mix composition on early-age autogenous deformations of cement pastes.** In: "International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation", Lyngby, 2006, RILEM Proceedings, PRO 52, O. M. Jensen, P. Lura, K. Kovler (2006) 261-272.

GLEYZE P.-J.-P., CYR M., ESCADEILLAS G. **Effects of metakaolin on autogenous shrinkage of cement pastes.** In: Cement and Concrete Composites, Volume 29, Issue 2, February 2007, Pages 80-87.

GRZYBOWSKI ,M.; SHAH,S.P.. **Shrinkage cracking of fiber reinforced concrete.** ACI Materials Journal, 1990, 87(2):138-148.

HAGYMASSY, J.; BRUNAUER, J. R.; MIKHAIL, R.S. **Pore structure analysis by water vapor adsorption.** Journal of Colloid and Interface Science 29(3) 485-491. 1969.

HANSEN, T.C. **Physical structure of hardened cement paste. A classical approach.** Materials and Structures. 19 (114) (1986) p. 423-436.

HASPARYK, N. P. et al. **Deformações por retração e fluência.** In: Geraldo Cechella Isaia. (Org.). Concreto - Ensino, Pesquisa e Realizações. 1 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2005, v. 2, p. 655-665.

HOLT, E. **Very early age autogenous shrinkage: governed by chemical shrinkage or self-desiccation?** In: Self-Desiccation and Its Importance in Concrete Technology, Lund, Sweden, 2002, pp. 1-26.

JENSEN, O.M. A dilatometer for measuring autogenous. deformation in hardening Portland cement paste. Mater. Struct. 28 (181) (1995) 406-409.

_____. **Influence of cement composition on autogenous deformation and change of the relative humidity.** In: Shrinkage of Concrete – Shrinkage 2000, Paris, 16-17 October 2000, RILEM Proceedings, PRO 17, Cachan (2000) 143-153.

_____. **Autogenous phenomena in cement-based materials.** University of Denmark, August, 2005, pp. 188.

_____. **Monitoring water loss from fresh concrete.** In: RILEM Proceedings PRO 46: Concrete durability and service life planning (ConcreteLife '06). Ed. Kovler, K., RILEM Publications S.A.R.L., Bagneux, France (2006a), pp. 197-202.

_____. **Curing.** Notas de aula. DTU-RILEM Doctoral Course - Concrete Curing: From the Research Lab to the Construction Site. Technical University of Denmark, Lyngby, August (2006b).

JENSEN, O. M.; HANSEN, P. F. **Autogenous deformation and change of the relative humidity in silica fume-modified cement paste.** ACI Materials Journal, V. 93, No. 6, 1996, p.539-543.

_____. **Autogenous deformation and RH-change in perspective,** Cem Con Res 31 (2001a) (12), pp. 1859–1865.

_____. **Water-entrained cement-based materials – I. Principle and theoretical background.** Cement and Concrete Research, 31 (4) (2001b) 647-654.

_____. **Water-entrained cement-based materials – II Experimental observations.** Cement and Concrete Research, 32 (6) (2002) 973-978.

JIA-PING, L.; QIAM, T.; WEI, S.; CHANG-WEN, M.; MING-SHU, T. **Study of self-dessication effect in early-age concrete and the determination of “time-zero” of self-dessication shrinkage** In: “International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation”, Lyngby, 2006, RILEM Proceedings, PRO 52, O. M. Jensen, P. Lura, K. Kovler (2006) 401-410.

KOVLER, K.; JENSEN, O. M. **Novel techniques for concrete curing.** Concrete International, Vol: 27, No: 9, September 2005, P: 39 – 42.

KUMM, T.C.. **Eeffects of particular parameters on autogenous shrinkage of cement pastes - Research planning and results.** Relatório de pesquisa. Technische Universität Kaiserslautern - Fachbereich ARUBI - Fachgebiet Baustofftechnologie und Bauschadenanalyse. Kaiserslautern, Agosto 2006a. 39pp. Não publicado.

KUMM, T.C.. **Internal and external curing on the mitigation of early shrinkage - Experiments and results.** Relatório de pesquisa. International RILEM Doctoral Course, Technical University of Denmark (DTU), August 2006b. 9pp. Não publicado.

LÖFGREN, I.; ESPING, O. **Early age cracking of self-compacting concrete.** In: “International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation”, Lyngby, 2006, RILEM Proceedings, PRO 52, O. M. Jensen, P. Lura, K. Kovler (2006) 251-260.

LPC Comissária de Despachantes Ltda. **Estatat tenta solução caseira para pólo em MG.** Disponível em: <<http://www.lpc.com.br/inter3.php>>. Página visualizada em Outubro de 2006.

LURA, P. **Autogenous deformation and internal curing of concrete.** Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, Delft, The Netherlands, 2003.

LURA, P.; JENSEN, O.M.. **Volumetric measurement in water bath: an inappropriate method to measure autogenous strain of cement paste.** PCA R&D Serial No. 2925, Portland Cement Association, Skokie, IL, 2005.

LURA, P.; DURAND, F., JENSEN, O.M.. **Autogenous strain of cement pastes with superabsorbent polymers.** In: “International RILEM

Conference on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation”, Lyngby, 2006, RILEM Proceedings, PRO 52, O. M. Jensen, P. Lura, K. Kovler (2006) 57-65.

LURA, P.; JENSEN, O.M.; WEISS, J.; BENTZ, D. P.; HOOTON, R. D.; KOVLER, K.; GOODWIN, F. **Proposed draft to ASTM: Standard Test Method for Autogenous Strain of Cement Paste and Mortar**. 2006. Trabalho não publicado.

MAILVAGANAM, N.P. **Miscellaneous admixtures**. In: Ramachandran, V. S. “Concrete admixtures handbook”. Noyes Publications, USA, 1984, pp. 480-497.

MINDESS, S.; YOUNG, J. F. **Concrete**. London: Prentice-Hall, 1981.

MOKAREM, D. W. **Development of concrete shrinkage performance specifications**, Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, May 2002.

MELO NETO, A. A. **Estudo da retração em argamassa com cimento de escória ativada**. São Paulo, 2002. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 215p.

MEHTA, P.K.; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. 1.ed. São Paulo: PINI, 1994, pg.573.

MOHR, B.J., HOOD, K.L., BUCHANAN, G.R. **Mitigation of Autogenous Shrinkage in Mortars: Analysis and Modeling of Water Migration and Comparison of Various Internal Curing Materials**. In: Proceedings of the International RILEM Conference on Volume Changes of Hardening Concrete: Testing and Mitigation, Lyngby, Denmark, RILEM Proceedings PRO 52, Eds. Jensen, O.M., Lura, P., Kovler, K., 2006: 127-136.

MÖNNIG, S. **Water saturated super-absorbent polymers used in high strength concrete**. In: Otto Graf Journal. “Annual Journal on Research and Testing of Materials” Vol.16, 2005. University of Stuttgart, p.193-202.

NAWA, T.; HORITA, T. **Autogenous shrinkage of high-performance concrete**. In: Proceedings of the International Workshop on Microstructure and Durability to Predict Service Life of Concrete Structures. Sapporo, Japan, Feb. 2004

NEVILLE, A.; AITCIN, P.C. **High performance concrete: an overview**. Materials and Structures, v.31, p.111-117, Mar. 1998.

NUNES, N. L.; FIGUEIREDO, A. D. . **Retração do Concreto de Cimento Portland**. São Paulo: Departamento de Engenharia de Construção Civil da Escola Politécnica da USP, 2007 (Boletim Técnico (BT/PCC/452)).

PAULINI P.: **A Weighing Method for Cement Hydration**. Proc. of the 9th Int. Congress on the Chemistry of Cement, Vol.IV, pp. 248-254, National Council for Cement and Building Materials, New Delhi (1992).

POWERS, T.C. AND BROWNYARD, T.L. **Studies of the physical properties of hardened Portland cement paste**. Bulletin 22, Research Laboratories. of Portland Cement Association, Skokie, IL, U.S., 1948. Reeditado por ACI - Concrete International, Agosto de 2003.

PYTLIK, E.; MOLINO, D.; MORITZ, J. **Superabsorbent Polymers**. Final report on the course “Introduction to polymers”, University at Buffalo. Disponível em : <<http://www.eng.buffalo.edu/Courses/ce435/Diapers/Diapers.html>>. Página visualizada em Fevereiro de 2007.

RAMACHANDRAN, V. S.; MALHOTRA, V. M. **Superplasticizers**. In: Ramachandran, V. S. “Concrete admixtures handbook”. Noyes Publications, USA, 1984, pp. 211-268.

RAVINDRA, K.; HEWLETT, P. C. ; DYER, T. D. **Influence of microstructure on the physical properties of self-curing concrete**. ACI Materials Journal Vol. 93. Sep-Oct, 1993. 7pp.

RAZAVI-NOURI, M.; MORSHEDIAN, J. **Impact, Compressive and Flow Properties of Fibre Reinforced Cementitious Composites**. Iranian Journal of Polymer Science and Technology, 4, 134-140 (1995).

RILEM Technical Committee “Internal Curing of Concrete”, TC 196 – ICC. Document ICC-N6, **Draft of Chapter 2: Definitions**. Trabalho não publicado, 2004a.

RILEM Technical Committee “Internal Curing of Concrete”, TC 196 – ICC. Document ICC-N18, **Draft of chapter 4: Materials and methods for internal curing**. Trabalho não publicado, 2004b.

REPETTE, W. L. **Concretos de Última Geração: Presente e Futuro**. In: Geraldo Cechella Isaia. (Org.). Concreto - Ensino, Pesquisa e Realizações. 1 ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto, 2005, v. 2, p. 1509-1550.

REPETTE, W.L. ; MAILVAGANAM, N. **Prehydrated high-alumina cement-based admixture for compensating autogenous shrinkage in high-performance concrete**. In: Second CANMET/ACI International Conference on High Performance Concrete, 1999, Gramado. Proceedings of the Second CANMET/ACI International Conference - ACI SP 186, 1999. v. I. p. 39-57.

SANT, G.; LURA, P.; WEISS, W. J. **Measurement of Volume Change in Cementitious Materials at Early Ages: Review of Testing Protocols and Interpretation of Results**. In: 85th Annual Meeting of the Transportation Research Board (TRB), Washington, January 22-26, 2006. Transportation Research Record, 2006.

TAYLOR, H.F.W. **Cement chemistry**. London: Academic Press, 1990. 474 p.

TAZAWA, E.; MIYAZAWA, S. **Influence of cement and admixture on autogenous shrinkage of cement paste**. Cement and Concrete Research, Volume 25, 1995, Pages 281-287.

TRAMFLOC, Inc. **Super Absorbent Polymers for Water Retention and Erosion Control**. Disponível em: <<http://www.tramfloc.com/tf62.html>>. Página visualizada em março de 2007.

TURCRY, P. **Le retrait plastique des bétons autoplaçants - Etude paramétrique de l'influence de la formulation**. Forum des Associations du Génie Civil - Prix Jeune Chercheur, 4 - 5 juin 2003, La Rochelle, 8 pages.

TURCRY, P.; LOUKILI, A. **Etude expérimentale du retrait et de la fissuration des bétons autoplaçants à l'état frais**, XXIIème Rencontres Universitaires de Génie Civil, 3 - 4 juin 2004, Marne La Vallée, 8 pages.

WEIDMANN, D. **Avaliação de dois aparatos utilizados na determinação do módulo de elasticidade de argamassas**. Trabalho apresentado à disciplina de Instrumentação de Ensaios (ECV 4211) do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina. Outubro (2006). Não publicado.

WEIDMANN, D.; DE FREITAS, J.C., KUMM, T. C. **Avaliação do desempenho de aditivos na manutenção de fluidez em pasta de cimento**. Artigo submetido à “E-mat - Revista de Ciência e Tecnologia de Materiais de Construção Civil”. Dezembro (2006). Não publicado.